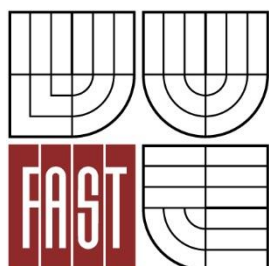




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT  
A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS  
AND COMPONENTS

# VLIV PARAMETRŮ DISPERGAČNÍHO MÉDIA NA KVALITU ROZMÍCHÁNÍ NANOČÁSTIC

THE INFLUENCE OF PARAMETRES ON THE QUALITY OF THE DISPERSION MEDIUM MIXED  
NANOPARTICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

LENKA KUTOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2016



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Lenka Kutová
<b>Název</b>	Vliv parametrů dispergačního média na kvalitu rozmíchání nanočástic
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	11. 3. 2015
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	27. 5. 2016
V Brně dne 11. 3. 2015	

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,  
MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,  
MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

### **Podklady a literatura**

Raki L., Beaudion J., Alizadeh R., Makar J., Sato T.: Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology. Materials 2010, 3.  
Grobert N.: Carbon nanotubes becoming clean. Mater Today 2007, 10 (1–2), pp. 28–35.  
Popov V.N.: Carbon nanotubes: properties and application. Mater Sci Eng R, 2004; 43.  
Wong E. W., Sheehan P. E., Lieber C. M.: Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. Science 1997, 277 (5334), pp. 1971–1975.  
Yazdanbakhsh A., Grasley Z., Tyson B., Abu Al-Rub R. K.: Distribution of carbon nanofibers and nanotubes in cementitious composites. Transp Res Rec, 2010, 2142, pp. 89–95.  
Abu Al-Rub R.K., Tyson B.M., Yazdanbakhsh A., Grasley Z.: Mechanical properties of nanocomposite cement incorporating surface-treated and untreated carbon nanotubes and carbon nanofibers. ASCE J Nanomech Micromech, 2012, 2(1), pp. 1–6.  
Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus, Science direct a další.  
Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií.

### **Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)**

Oblast nanotechnologií prodělala za posledních několik desítek let velký vývoj. Rozvoj nanotechnologií souvisí s novými možnostmi v oblasti zobrazovací techniky a syntézy částic. Velmi slibným materiálem se zdají být uhlíkové nanotrubičky, které oplývají neobyčejnými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi. Problém při jejich implementaci do cementové matrice spočívá v jejich bezvadném rozmíchání v suspenzi tak, aby byly jednotlivé trubičky co nejvíce uvolněny z aglomerátů, ale současně nebyla poškozena jejich stavba.

Cílem Vaší práce bude ověřit vliv teploty média na průběh dispergace uhlíkových nanotrubiček. Ze získaných disperzí nanočástic připravte zkušební vzorky (cementové pasty, cementové malty) a stanovte jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti. Provedte sledování mikrostruktury v jednotlivých obdobích zrání zkušebních vzorků na rastrovacím elektronovém mikroskopu v časech 1, 3, 7 a 28 dní.

Minimální rozsah bude 45 stran.

### **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá sledováním vlastností cementového kompozitu s využitím nanočástic. V teoretické části je popsána výroba nanočástic, vlastnosti a jejich vliv na cementové kompozity jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. V experimentální části bakalářské práce byly stanoveny fyzikálně-mechanické vlastnosti cementových kompozitů s nanočásticemi. Na rastrovacím elektronovém mikroskopu byla sledována mikrostruktura kompozitů po 1, 3, 7 a 28 dnech zrání. A na závěr byly porovnány mechanické vlastnosti kompozitu s referenčními vzorky bez nanočástic.

### **Klíčová slova:**

Nanočástice, cementový kompozit, uhlíkové nanotrubičky, dispergace

## **ABSTRACT**

The thesis deals with monitoring the characteristics of cement composite using nanoparticles. The theoretical part describes nanoparticles production, their characteristics and influence on cement composites, both in fresh and hardened state. In the practical part of the thesis physically-mechanical characteristics of cement composites with nanoparticles are determined. The microstructure of the composites was monitored on a scanning electron microscope for 1, 3, 7 and 28 days of maturing. And finally mechanical characteristics of the composite and the reference samples without nanoparticles were compared.

### **Keywords:**

Nanoparticles, cement composite, carbon nanotubes, dispersion

#### **Bibliografická citace VŠKP**

KUTOVÁ, Lenka. *Vliv parametrů dispergačního média na kvalitu rozmíchání nanočástic*. Brno, 2016. 79 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2015.

.....  
podpis autora  
Lenka Kutová

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat paní Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled. Také bych chtěla poděkovat Ing. Tomáši Jarolímovi a Ing. Martinu Labajovi za asistenci a podporu při vypracování práce. Mé díky také patří celé rodině a příteli, kteří mi byli duševní oporou po celé studium. Děkuji

# Obsah

<b>I. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
1 Úvod .....	12
2 Cíl práce .....	13
3 Počátky nanotechnologií .....	14
2.1 Rozdělení nanotechnologie .....	14
4 Uhlíkové nanotrubičky .....	15
4.1 Struktura nanotrubiček .....	16
4.1.1 Jednotkové buňky nanotrubiček .....	18
4.1.2 Vrstvená struktura MWCNT .....	18
4.2 Vlastnosti CNT .....	19
4.2.1 Chemické vlastnosti .....	20
4.2.2 Mechanické vlastnosti .....	20
4.2.3 Optické vlastnosti .....	22
4.2.4 Tepelné vlastnosti .....	23
4.2.5 Absorpční vlastnosti .....	23
4.2.6 Magnetické vlastnosti .....	24
4.2.7 Elektrické vlastnosti .....	25
5 Výroba uhlíkových nanotrubiček .....	26
5.1 Obloukový výboj .....	26
5.2 Laserová ablace .....	27
5.3 Metoda CVD – Chemical Vapour Deposition .....	29
6 Uhlíkové nanotrubičky v kompozitech .....	31
6.1 Nanočástice v cementu a betonu .....	31
6.2 Kompozitní materiály .....	31
6.3 Funkcionalizace uhlíkových nanotrubiček .....	31



<b>7 Dispergace nanočástic .....</b>	<b>33</b>
7.1 Dispergace MWCNT .....	34
7.2 Mechanická dispergace .....	34
7.3 Ultrazvuková dispergace .....	34
7.4 Konkrétní typy zařízení pro dispergaci nanočástic .....	35
7.4.1 Sonorex RK 31H .....	35
7.4.2 Magnetické míchadlo Phoenix Instrument RSM-10 HS .....	36
7.4.3 Ultrazvukový kavitátor Sonopuls HD 3200 .....	37
<b>8 Vliv teploty na dispergaci nanočástic .....</b>	<b>38</b>
8.1 Vliv teploty - experiment .....	38
8.2 Zeta potenciál .....	38
8.3 Vliv teploty na mechanické vlastnosti .....	39
8.4 Vliv teploty na MWCNT produkované katalýzou .....	40
<b>9 Využití uhlíkových nanotrubiček .....</b>	<b>41</b>
9.1 Kompozitní materiály .....	41
9.2 Mechanické aplikace .....	41
9.3 Senzory .....	41
9.3 Elektronické aplikace .....	41
9.4 Energetické aplikace .....	42
<b>10 Čištění nanotrubiček .....</b>	<b>43</b>
10.1 Oxidace .....	43
10.2 Čištění kyselinou .....	44
10.3 Magnetické čištění .....	44
10.4 Ultrazvuk .....	44
10.5 Žihání a tepelné zpracování .....	44
10.6 Mikrofiltrace .....	44
10.7 Chromatografie .....	45

<b>11 Charakterizační metody CNT .....</b>	<b>46</b>
11.1 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) .....	46
11.1.1 Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA 3 XM .....	47
11.2 Transmisní elektronová mikroskopie (TEM) .....	49
11.3 Infračervená spektroskopie (IR) .....	50
11.4 Ramanova spektroskopie .....	51
<b>12 Rizika při používání nanomateriálů .....</b>	<b>52</b>
12.1 Toxicita nanočástic .....	52
<b>II. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>54</b>
<b>13 Cíl experimentu .....</b>	<b>54</b>
<b>14 Použité materiály a zařízení .....</b>	<b>54</b>
14.1 Použité materiály .....	54
14.2.5 Použitá laboratorní zařízení .....	54
<b>15 Experiment .....</b>	<b>55</b>
15.1 Receptura .....	55
15.2 Příprava vzorků .....	55
15.2.1 Příprava suspenze .....	55
15.2.2 Výroba zkušebních těles .....	55
15.3 Postupy zkoušek .....	55
15.3.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku .....	55
15.3.2 SEM – rastrovací elektronová mikroskopie .....	56
<b>16 Výsledky .....</b>	<b>57</b>
16.1 Dispergace pomocí ultrazvukové vaničky .....	57
16.2 Dispergace pomocí ultrazvukového kavitátoru .....	57
16.3 Pevnost v tahu za ohybu .....	57
16.4 Pevnost v tlaku .....	58
16.5 SEM – rastrovací elektronová mikroskopie .....	58

<b>17 Diskuse výsledků.....</b>	<b>59</b>
<b>18 Závěr .....</b>	<b>60</b>
<b>19 Zdroje .....</b>	<b>61</b>
<b>20 Seznam příloh .....</b>	<b>66</b>
20.1 Seznam obrázků .....	66
20.2 Seznam grafů.....	67
20.3 Seznam tabulek .....	68
<b>21 Seznam použitých zkratek .....</b>	<b>69</b>

# I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 Úvod

Ještě v polovině minulého století byly nanotechnologie neznámým oborem. Technologický rozvoj v posledních asi 30 letech umožnil rozšířit fyzikální výzkum do oblasti nanotechnologie, kde se pracuje s nanostrukturami, tj. strukturami o rozměrech přibližně v intervalu od 1 nm do 100 nm. Uhlíkové nanočástice patří do skupiny velmi slibných materiálů pro využití v blízké budoucnosti ve velmi širokém spektru aplikací díky svým jedinečným vlastnostem.

Své uplatnění již nalézají hlavně v elektronice v oblasti s tranzistory, vodivých propojů, ale i v mnoha dalších aplikacích jako jsou multifunkční nanokompozitní materiály. Nevýhodou je, že zatím nelze průmyslově tyto částice vyrobit s naprostou čistotou a bez defektů a proto je potřeba provádět následné čištění. Vzhledem k velikosti částic, které díky svým rozměrům mohou pronikat do tkání, se stále více hovoří o možné toxicitě uhlíkových nanočástic.

Uhlíkové nanotrubičky jsou tedy novým unikátním materiálem. Jejich výroba je zatím velice drahá, ovšem lze očekávat, že v ne příliš vzdálené budoucnosti již tento materiál bude na trhu k dostání za příznivějších finančních podmínek.

## 2 Cíl práce

Cílem této práce je studium kompozitů s nanočásticemi. Rešerše poznatků z oblasti nanotechnologie a vlivu teploty na uhlíkové nanočástice. V experimentální části práce bude provedeno sledování teplot suspenze při dispergaci nanočástic. Na zkušebních vzorcích cementových kompozitů budou stanoveny fyzikálně-mechanické vlastnosti a sledování mikrostruktury v jednotlivých obdobích zrání zkušebních vzorků na rastrovacím elektronovém mikroskopu v časech 1, 3, 7 a 28 dní.

### 3 Počátky nanotechnologií

Richard Philips Feynman byl jeden z prvních, kdo se o této vědní disciplíně oficiálně zmínil. Americký vědec a nositel Nobelovy ceny za fyziku. Ve svých přednáškách zmínil možnost manipulace s atomy a molekulami. Tenkrát se obor nazýval mikrotechnologie. [32]

Termín nanotechnologie se začal objevovat až v roce 1974. V druhé polovině 20. století se prováděli výzkumy na sledování vlastností základních stavebních prvků hmoty. Především byly orientovány na způsoby, kterými příroda vytváří rozmanité struktury. [32]

#### ***2.1 Rozdělení nanotechnologie***

Nanotechnologií se označuje obor, který se zabývá tvorbou a využíváním technologií v měřítku řádově nanometrů. Pro porovnání, nanometr je zhruba tisícina tloušťky lidského vlasu. [33]

V současné době lze rozdělit nanotechnologie do osmi hlavních oblastí:

- nanomateriály;
- nanotechnologie pro ukládání a přesnost informací;
- nanobiotechnologie, nanomedicína;
- nanotechnologie pro aplikaci v senzorech;
- nanotechnologie pro (elektro) chemické technologie zpracování;
- dlouhodobý výzkum s širokou aplikací;
- přístroje a zařízení, výzkum a aplikace technologií;
- zdravotní, ekologické a sociální aspekty nanotechnologie.

Bakalářská práce je zaměřena na nanomateriály, které dále můžeme rozdělit na:

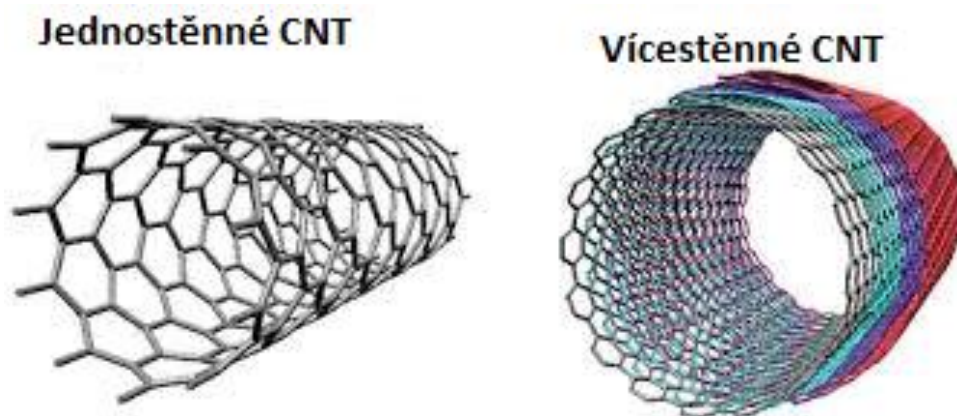
- nanoprášky, nanočástice;
- kompozitní materiály obsahující nanočástice;
- materiály s uhlíkovými trubicemi nebo fullereny;
- nanostrukturní kovy a slitiny, nanokeramika;
- polymerní nanokompozitů, polymerní nanomateriály. [32]

## 4 Uhlíkové nanotrubičky

Uhlík je základním stavebním prvkem mnoha materiálů, a to jak z pohledu struktury tak i jejich vlastností. Bohatost uhlíkových struktur lze porovnat právě na nanotrubičkách, které jsou tvořeny srolovanými uhlíkovými rovinami. Jako hlavní máme dva druhy nanotrubiček a to jednostěnné a víceštěnné.

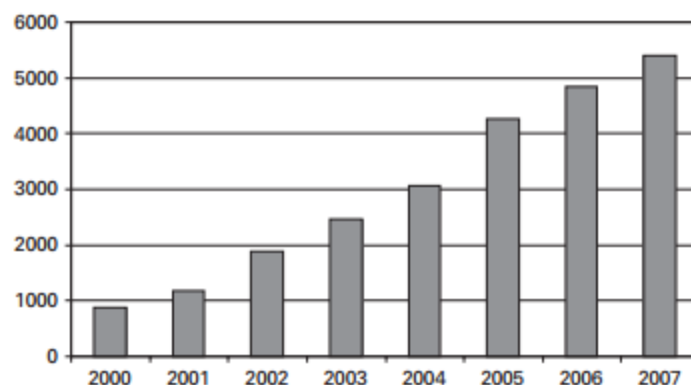
Jednostěnné CNT jsou ty, které jsou tvořeny z jedné vrstvy grafitu a jsou srolovány do hladkého válce. Většina jednostěnných nanotrubiček (SWCNT) má průměr okolo 1 nm. SWNT vykazují mimořádné elektrické vlastnosti oproti víceštěnným. Jejich výroba je stále velmi drahá, což může mít negativní dopad na budoucnost uhlíkové nanotechnologie.[3]

Víceštěnné uhlíkové nanotrubičky (MWCNT) jsou v podstatě souborem soustředných SWCNT. Jejich strukturu trubice tvoří více vrstev grafitu srolovaných k sobě s různými průměry. Jejich vlastnosti jsou odlišné od SWCNT. Zvláštním případem MWCNT jsou dvoustěnné CNT, jejichž vlastnosti jsou spíše podobné SWCNT než MWCNT.[3]



*Obrázek 1: Jednostěnné nanotrubičky (SWCNT) vlevo a víceštěnné nanotrubičky (MWCNT) vpravo[5]*

Zájem o uhlíkové nanotrubičky od zveřejnění výzkumu pana Iijimi v roce 1991 stále roste. To lze vidět v nárůstu ročního celkového počtu příspěvků na nanotrubičky. V roce 2000 jich bylo 886, kdežto v roce 2007 už 5406 (Obrázek 2). [5]



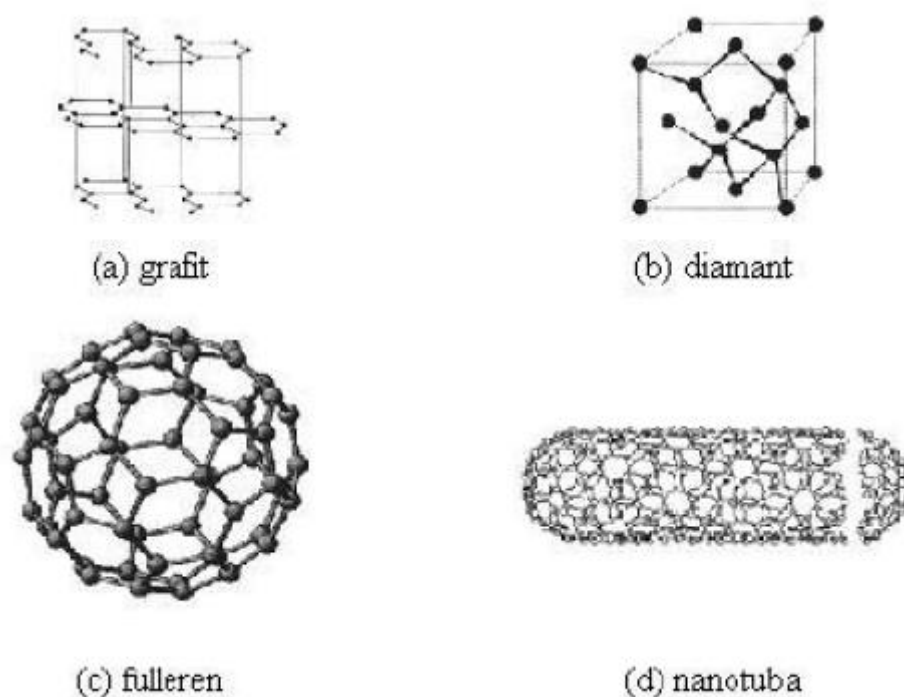
*Obrázek 2: Počet článků o uhlíkových nanotrubičkách od roku 2000 do roku 2007. [5]*

Stavební částice nanomateriálů jsou nanočástice s definovanými vlastnostmi, rozměry, tvarem, atomovou strukturou, krystalickou mřížkou, mezifázovým rozhraním, nehomogenním a chemickým složením. Rozměry jsou limitované v oblasti od molekul k pevným částicím menším jak 100 nm. Z důvodu malých rozměrů v některých případech počet povrchových atomů převyšuje počet atomů ve vnitřním objemu. Částice mohou být spojeny koalescencí nebo podložkou a mohou vytvářet nanodráty, nanotrubičky nebo nanokompozity. [43]

#### **4.1 Struktura nanotrubiček**

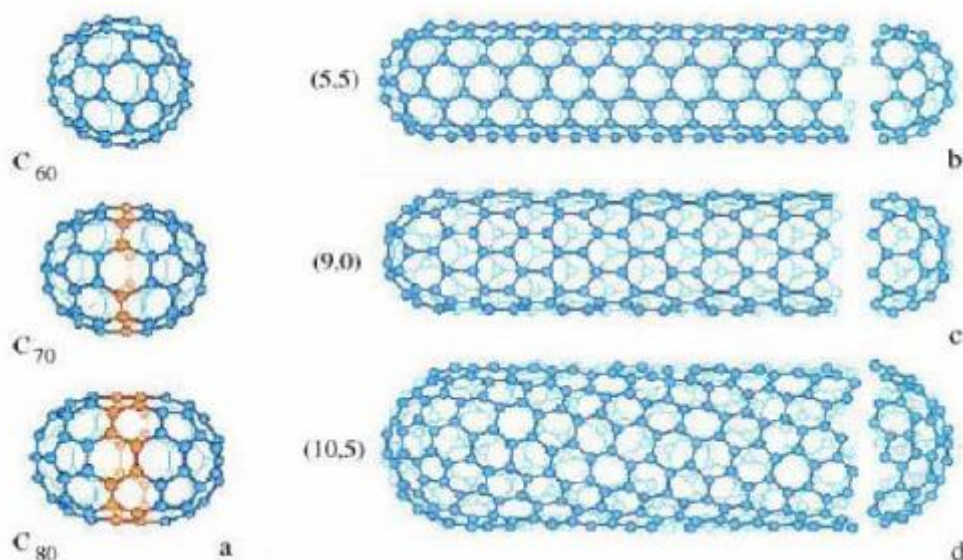
Uhlíkové nanotrubičky jsou desky zhotovené z grafitu, které jak už bylo řečeno, srolovány do válcového tvaru. Grafitové listy mohou být rolovány několika způsoby a mohou vznikat různé typy uhlíkových nanotrubiček. Jsou to téměř jednodimenzionální struktury, v závislosti na jejich poměru délky k průměru.[7] Struktura nanotrubiček je tvořena více elektricky i teplotně vodivými, mechanicky silnějšími a biologicky i aktivnějšími než grafit. Díky této delokalizaci můžeme do struktury nanotrubiček zapojit určité defekty, jako jsou například pentagony a heptagony. Tyto chemické vazby mají za následek vytvoření zahnutých nebo spirálovitých nanotrubiček, ve kterých budou elektrony lokalizovány právě v pentagonech a hexagonech. Nanotrubičky rozlišujeme nejen na jednovrstvé a vícevrstvé, ale také na defektní a bezdefektní. Za bezdefektní považujeme nanotrubičky, které se skládají pouze z hexagonální struktury. Kdežto za defektní považujeme ty, které obsahují topologické defekty, jako heptagony, pentagony nebo jiné chemické či strukturní defekty. [10]





Obrázek 3: Formy čistého uhlíku [43]

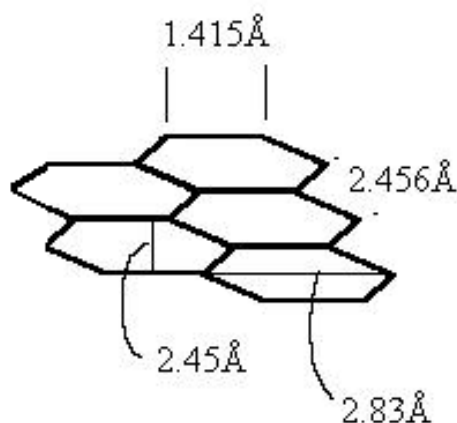
V závislosti od směru rolování rozlišujeme tři typy CNT mřížek: armchair, zigzag a chiral znázorněné na obrázku 4. [43]



Obrázek 4: Rozložení atomů uhlíku v hexagonální mřížce – (a) SWCNT, (b) armchair, (c) zigzag, (d) chiral[43]

#### 4.1.1 Jednotkové buňky nanotrubiček

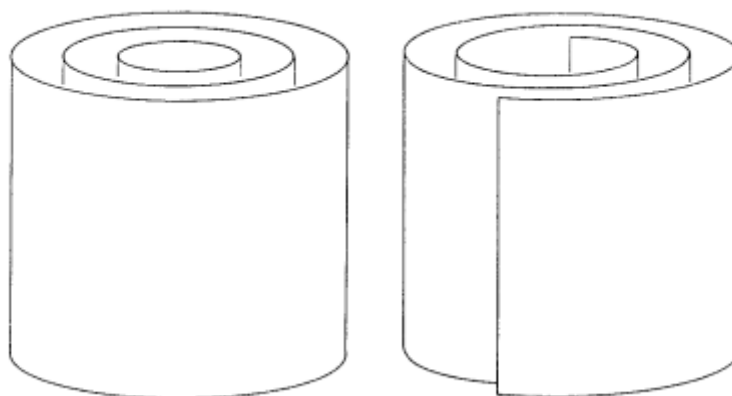
Budeme-li uvažovat o nanotrubičkách jako o jednozměrném krystalu, můžeme definovat translační jednotku buněk podél osy trubky. U všech nanotrubiček má translační jednotka buňky podobu válce. Pro nanotrubičky v rozsahu průměru, který je obvykle pozorován experimentálně ( $\sim 2 - 30$ ) nm. Například trubička, která má průměr přibližně 10 nm, má základní buňku dlouhou 54,3 nm s obsahem 64 996 atomů. Tyto velké jednotkové buňky mohou představovat problém při výpočtu elektronických a vibračních vlastností nanotrubiček. Z tohoto důvodu byl navržen alternativní způsob generování trubkové struktury, což činí použití čelních operátorů. [5]



Obrázek 5: Vzdálenosti mezi uhlíkovými atomy uvnitř grafitové mřížky [38]

#### 4.1.2 Vrstvená struktura MWCNT

Nejzákladnější otázkou týkající se struktury vrstvy MWCNT je, zda MWCNT mají rolování jako „švýcarský válec“, nebo mají strukturu jako „Ruská panenka“. Tyto dvě uspořádání jsou znázorněna na obrázku 6. Experimentální studie obecně ukazují na strukturu ruské panenky, alespoň pro MWCNT vyrobené obloukovým odpařováním. Pokud jsou soustředné grafenové trubky od sebe vzdáleny přibližně 0,334 nm, pak po sobě jdoucí trubky by se měly v průměru lišit o 2,1 nm. [5]



*Obrázek 6: Schématické znázornění „švýcarský válec“ vlevo a „ruská panenka“ vpravo [5]*

## **4.2 Vlastnosti CNT**

Jednou z nejdůležitějších vlastností CNT je, že se chovají jako vodiče, nebo jako polovodiče v závislosti na jejich struktuře. Proto jsou uhlíkové nanotrubičky ideální pro použití v elektronice nebo nanoelektronice. Oproti tomu jejich mechanické vlastnosti jsou dobré pro využití jako plnivo do polymerní matrice či betonu [5]. Nanotrubičky mají průměry v rozmezí od 1 nm do 50 nm a délku až 300  $\mu\text{m}$ . Mají extrémně velký poměr délka/šířka, což je jednou z jejich zajímavých vlastností. Uhlíkové nanotrubičky mohou mít jak kovový, tak polovodičový charakter v závislosti na tom, jak se uhlíkový plát sbalí. Další výbornou vlastností je jejich vysoká mechanická pevnost a tepelná vodivost. [40] Experimenty prokázaly, že nanotrubičky jsou nejpevnější a nejsilnější vlákna, jaká jsou známa. Vlastnosti uhlíkových nanotrubiček nachází uplatnění v celé řadě oblastí. [5]

Kompozitní materiály vyztužené mikro anebo nanovláknem zvyšují pevnosti a lomové houževnatosti, odolnost proti opotřebení, únavě a proti korozi. CNT mají výjimečné mechanické vlastnosti, zejména vysokou pevnost v tahu a malou hmotnost. Díky silné vazbě mezi CNT a matricí jsou značně odolné vůči opotřebení a erozi. [43]

Tab. 1: Porovnání vlastností uhlíkových vláken a uhlíkových nanotrubiček [43]

	Modul pružnosti v tahu (GPa)	Pevnost v tahu (GPa)	Predlženie (%)	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Uhlíkové vlákna</b>	270 - 390	2.1	1,5	2,1
<b>Jednostenné uhlíkové nanotrubičky (SWCNT)</b>	1000 - 4500	< 100	15 - 23	1,3 - 1,4
<b>Viacstenné uhlíkové nanotrubičky (MWCNT)</b>	800 - 900	< 150	-	1,3 - 1,4

CNT jsou jedním z mechanicky nejpevnějších materiálů. Jejich vysoká pevnost, tuhost a modul pružnosti jim definují ideální vlastnosti, které se uplatní při přípravě nanokompozitních materiálů. [43]

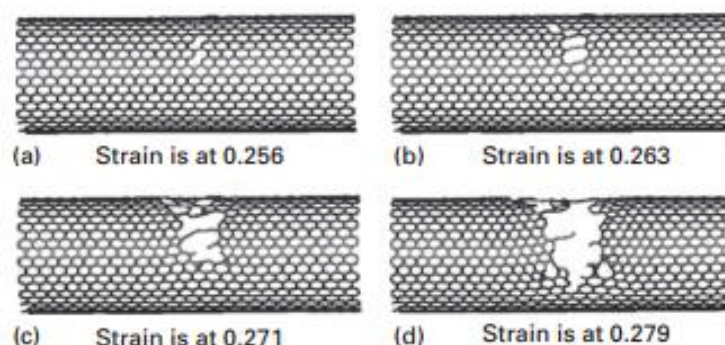
#### 4.2.1 Chemické vlastnosti

Uhlíkové nanotrubičky jsou odolné vůči silným zásadám či kyselinám. Chemickou reaktivitu ovlivňuje například zvýšená zakřivenost CNT nebo množství defektů. Čím více defektů CNT mají, tím jsou reaktivnější. CNT mají velký poměr délka/průměr, což znamená, že mají velký specifický měrný povrch, díky kterému se zvyšuje reaktivita s okolním prostředím.[4] CNT jsou kvůli silným Van der Walsovým silám přitahovány k sobě a vytváří shluky. Proto je velmi obtížnou disciplínou jejich dispergace.[5]

#### 4.2.2 Mechanické vlastnosti

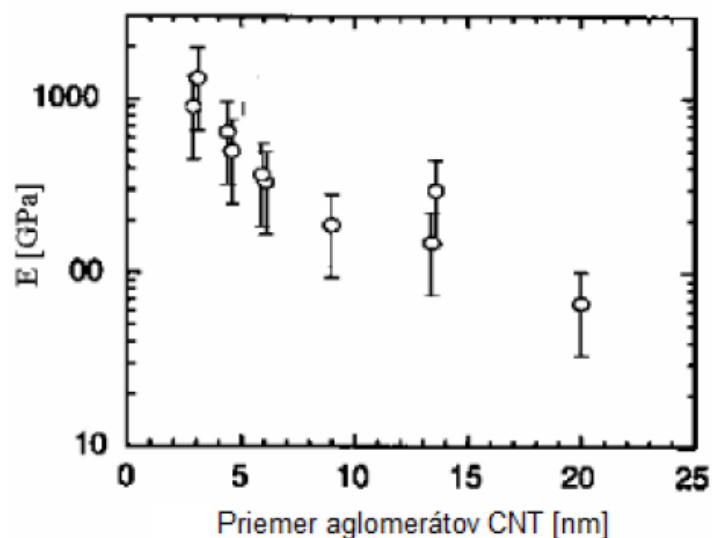
CNT mají velice vysokou mechanickou pevnost díky vazbě uhlík–uhlík. Zpravidla se jedná o nejpevnější materiál, který byl vyroben. Youngův modul pružnosti může dosahovat hodnot až 1000 GPa, což je zhruba pětikrát více než má ocel. Pevnost v tahu může být až 63 GPa, což je v porovnání s ocelí asi padesátkrát více. Tyto vlastnosti umožňují nanotrubičkám, spolu s jejich nízkou hustotou, která je okolo 1750 kg/m<sup>3</sup> [19] má velký potenciál v celé řadě konstrukčních aplikací, nebo mohou být začleněny do kompozitních materiálů. CNT jsou také velmi dlouhé a pružné vzhledem k jejich poměru šířka / délka. [5]

Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky jak už bylo řečeno, jsou velice pružné a houževnaté, dají se opakovaně ohýbat a to aniž by došlo k jejich poškození. Mezi jednotlivými soustřednými vrstvami je mezera, kterou nám způsobuje právě vratná deformace. SWCNT vykazují vyšší mechanické vlastnosti než MWCNT. Youngův modul pro SWCNT dosahuje hodnot 1000 GPa a pevnosti od 50 do 500 GPa. Oproti tomu Youngův modul pro MWCNT dosahuje hodnot od 300 do 1000 GPa a pevnosti 10 až 60 GPa, ale jsou vratně deformovatelné. [7]



*Obrázek 7: Simulace křehkého lomu jednostěnné nanotrubičky při deformaci [5]*

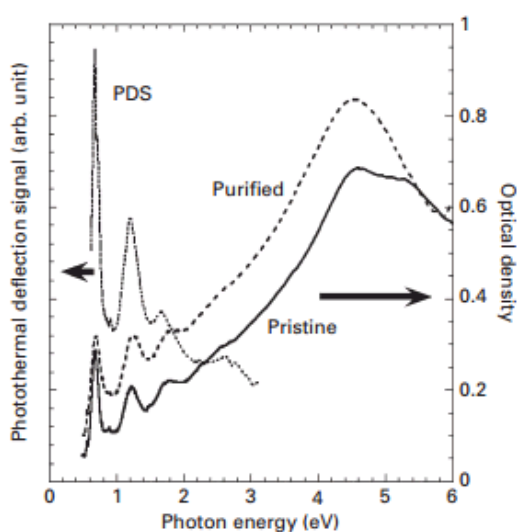
Vratná deformace u MWCNT je způsobena volným prostorem mezi jednotlivými šířkami. K měření mechanických vlastností nanotubic se používá AFM (atomic force microscopy – mikroskopie atomárních sil). Je zřejmé, že s rostoucím průměrem nanotrubiček se mechanické pevnosti snižují. [43]



Obrázek 8: Závislost Youngova modulu pružnosti na průměru shluků CNT [43]

#### 4.2.3 Optické vlastnosti

Pomocí optických vlastností nanotrubiček lze určit asymetrii prostorového rozložení trubic ve vzorku. K určení optických vlastností CNT se nejvíce používá metoda absorpční spektroskopie. Optické vlastnosti uhlíkových nanotrubiček zajišťují  $\pi$  plasmony, což jsou kvazičástice (kvantum) podélných oscilací elektronového plynu v pevných látkách. Bylo zjištěno, že pozice píků se mírně liší pro různé průměry SWCNT. Na absorpčním spektrometru máme viditelné tři píky o energiích 0,68 eV, 1,2 eV a 1,7 eV. [5] [15]



Obrázek 9: Optická absorpční spektra SWCNT připravené metodou oblouku [5]

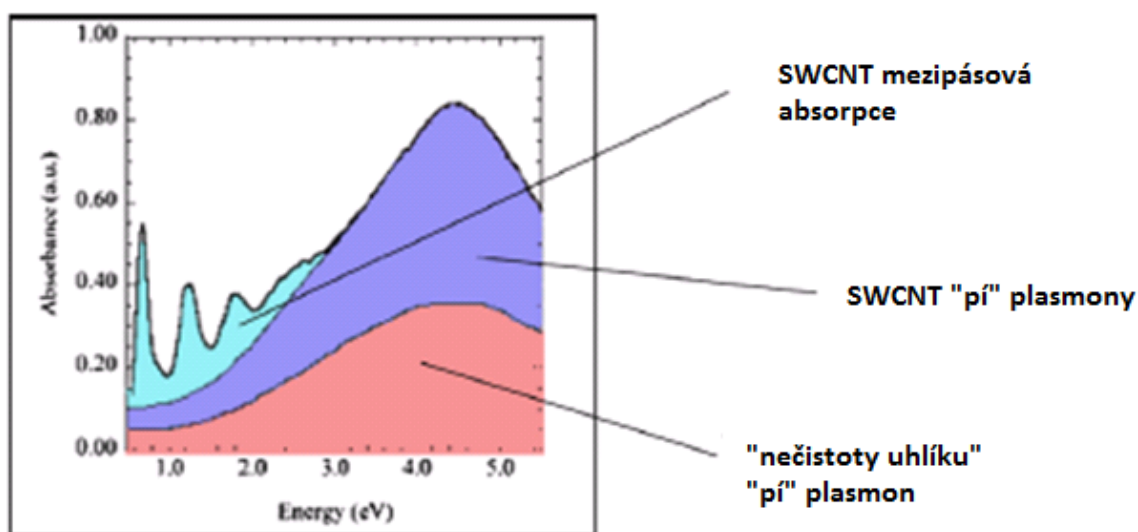
#### 4.2.4 Tepelné vlastnosti

Tepelná vodivost grafitu při pokojové teplotě dosahuje hodnoty až 2000 W/(mK). Krystalický uhlík vykazuje největší naměřenou hodnotu tepelné vodivosti ze všech známých materiálů a to 2000 až 2500 W/(mK). Co se týče uhlíkových nanotrubiček, předpokládáme hodnoty podobné nebo dokonce vyšší. [5]

Teplotní roztažnost i tepelná vodivost jsou u CNT anizotropní. Ve směru osy nanotrubiček jsou hodnoty obou parametrů vyšší, než ve směru kolmém na osu trubiček. Udává se, že uhlíkové nanotrubičky jsou stabilní do teploty 2800 °C ve vakuu a na vzduchu do 750 °C. Pokud budeme nanotrubičky vystavovat vysokým teplotám dlouhou dobu, nastane u nich k degradační oxidaci. V inertní atmosféře dusík nebo argon jsou uhlíkové nanotrubičky stabilní do teplot 1500 °C až 1800 °C. Po delším působení nanotrubiček v inertní atmosféře za vysokých teplot dojde k přetvoření na polyaromatickou pevnou látku. [5]

#### 4.2.5 Absorpční vlastnosti

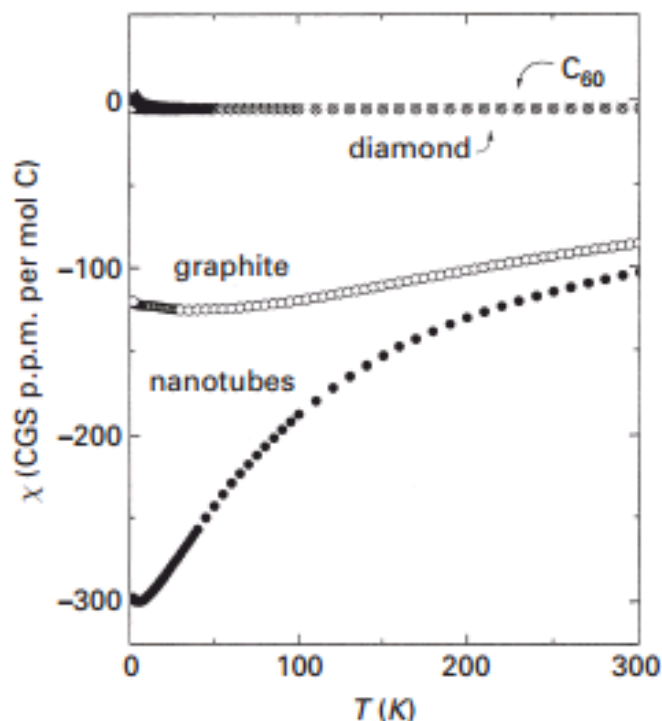
Uhlíkové nanotrubičky mají velký měrný povrch (až stovky g/m<sup>2</sup>), díky tomu jsou schopny pohlcovat plyny a kapaliny. Tato schopnost se dá využít při výrobě palivových článků. CNT mají velmi dobré akumulární schopnosti ze všech uhlíkových materiálů. Jednotěnné uhlíkové nanotrubičky udávají hodnotu akumulární kapacity na 110 mAh/g. [5]



Obrázek 10: Absorpční spektrum SWCNT [7]

#### 4.2.6 Magnetické vlastnosti

Uhlíkové nanotrubičky jedno jestli SWCNT nebo MWCNT mají diamagnetické (forma magnetismu, která se objevuje jen v případě přítomnosti vnějšího magnetického pole) chování a zeslabující účinky působícího magnetického pole. [14] Magnetické vlastnosti grafitu dominují přítomností kruhových proudů, což jsou elektronové dráhy oběžné nad a pod šestiúhelníkovými rovinami mřížky, které zahrnují několik atomů o jejich poloměru. Některé dřívější studie magnetické odolnosti provedl Artur Ramirez a jeho kolegové z Bell Labs. Tito pracovníci studovali celou řadu uhlíků, včetně nečištěných vzorků nanotrubiček v rozmezí teplot od absolutní nuly do teploty místnosti pomocí supravodivého kvantového zařízení pro měření magnetického pole. Výsledky měření jsou uvedeny na obrázku 11. Jak lze vidět, vzorek nanotrubiček vykazuje zcela odlišné chování v porovnání s ostatními atomy uhlíku, které mají velkou náchylnost diamagnetické odolnosti, která se zvyšuje s klesající teplotou. Výsledky jasně ukazují, že nanotrubičky mají větší náchylnost na zvyšující se teplotu než grafit. [5]



Obrázek 11: Magnetické vnímání allotropů uhlíku v závislosti teploty na práci (osa x – teplota; osa y – práce udávaná p.p.m ( miliontině celku) [5]



#### **4.2.7 Elektrické vlastnosti**

Uhlík ve vhodné formě je elektrochemicky inertní, vysoce vodivý a poddajný k chemickým funkcionalizacím měnící elektrochemické chování. Elektrochemické vlastnosti jsou využívány v aplikacích spojených se senzory, baterie nebo také zařízení pro uchování energie.

Závislost na chirálním vektoru máme SWCNT buď kovově vodivé, nebo polovodivé. Rozdíly ve vodivosti jsou způsobeny molekulární strukturou. Směr vodivostních pásů nám ovlivňuje natočení grafenové vrstvy. Elektrická vodivost je pro SWCNT i MWCNT stejná a uvádí se  $10 - 10^3$  S/m při 30 °C. [4]

Jak by se dalo očekávat od struktury CNT, elektrické vlastnosti jsou velice anizotropní. Elektronová pohyblivost v rovinách je vysoká, v důsledku překrývání  $\pi$  orbitalů v sousedních atomech. Měrný odpor při teplotě místnosti v rovině z vysoce kvalitních monokrystalů grafitu je přibližně  $0,4 \mu\Omega$ . Nicméně mobilita kolmo k rovinám je poměrně nízká. [5]

## 5 Výroba uhlíkových nanotrubiček

Technologie, jakou jsou tvořeny CNT, není přesně známá. Mechanismus růstu nanotrubiček je stále předmětem studia. Předpokládá se, že na tvorbě nanotrubiček se podílí více mechanismů. Mezi hlavní technologie výroby nanotrubiček je obloukový výboj, laserová ablace a metoda CVD (Chemical Vapour Deposition). [11]

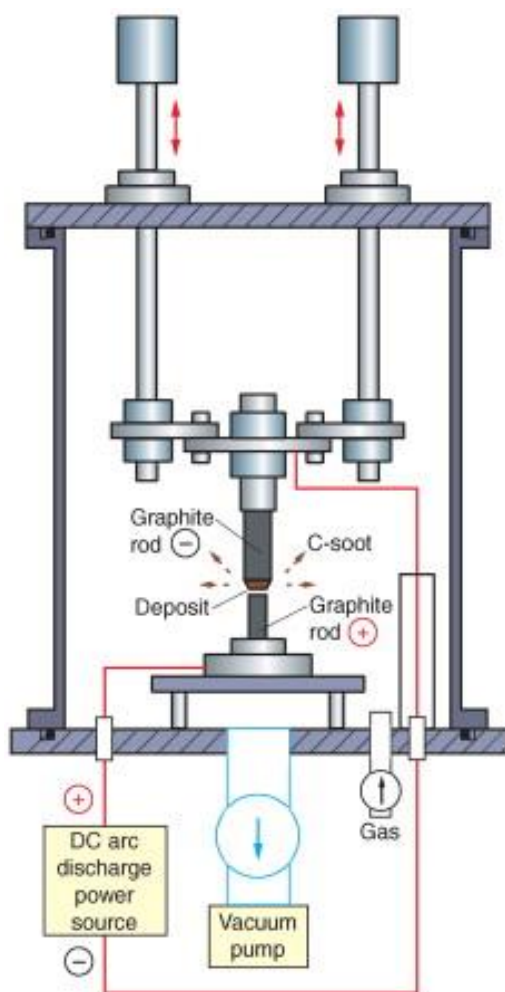
### 5.1 Obloukový výboj

V roce 1991 pomocí této metody pan Iijima v podstatě objevil uhlíkové nanotrubičky. Tato metoda se původně používala na výrobu fullerenu  $C_{60}$ . Pan Iijima pozoroval uhlíkové jehly, které měli délku až 1 mm a průměr od 4 do 30 nm. Pomocí transmisní elektronové mikroskopie bylo zjištěno, že každá z jehel zahrnuje koaxiální trubičky z grafitových listů, jejichž počet byl od 2 do 50, které se označily postupem času za vícevrstvé uhlíkové nanotrubičky. [12]

Tato metoda pracuje na principu obloukového odpařování dvou uhlíkových elektrod. Elektrody jsou umístěny zhruba 1 mm od sebe v reaktoru naplněném inertním plynem. [12] Jako inertní plyn se nejčastěji používá helium (He), případně argon (Ar). [4] Tato metoda pracuje za nízkého tlaku a to zhruba 5 až 70 kPa. Metoda využívá stejnosměrný proud v rozmezí 50 až 120 A a pracuje za nízkého napětí 12 až 25 V. Tímto principem vytvoří vysokoteplotní výboj mezi uhlíkovými elektrodami. Na kladné elektrodě se pomocí výboje odpařuje uhlík a vytváří malé uhlíkové klastry na záporné elektrodě. [12]

Dle toho, jakou použije směs helia a argonu, závisí statické rozložení průměru výsledných nanotrubiček. Každá směs má jiné tepelné vodivosti a difúzní koeficienty, což má vliv na rychlost jakými se mísí a ochlazují molekuly katalyzátoru a uhlíku. Uhlík tvoří na kovových klastrech nanotrubičky různých velikostí v závislosti na míře ochlazování v plazmě. [12]

Výhodou této metody je díky vysoké teplotě možnost produkovat nanotrubice s velmi dobrou krystalografií a ve velkých množstvích s výtěžkem 30 – 90 %. [12]



Obrázek 12: Schéma aparatury pro přípravu MWCNT v elektrickém oblouku [39]

## 5.2 Laserová ablace

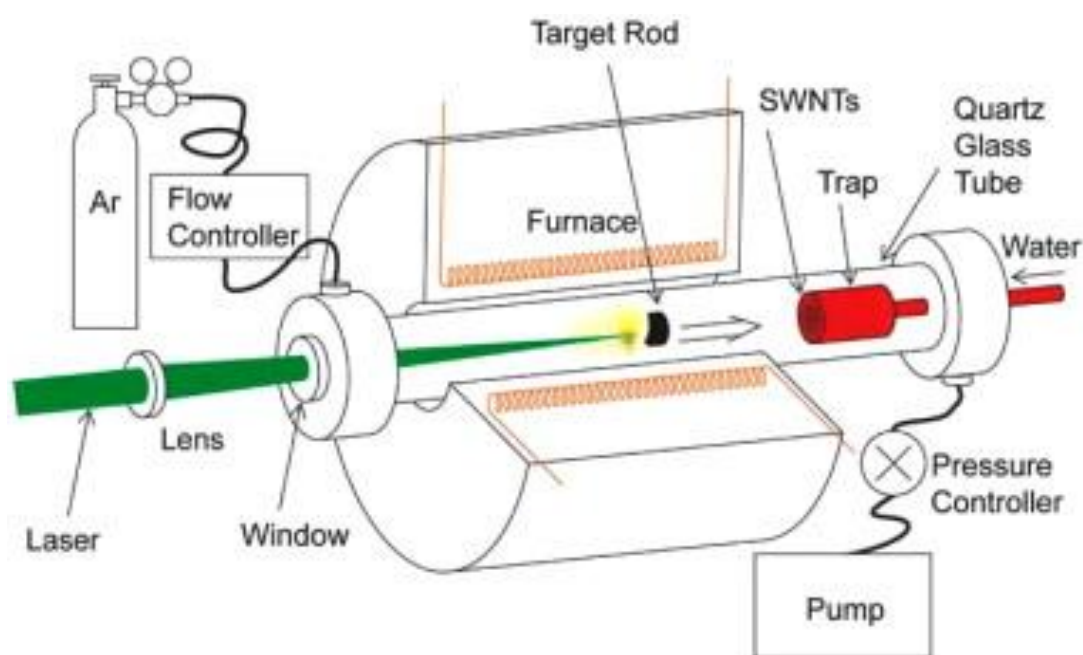
V roce 1996 Smalley a jeho spolupracovníci vyvinuli metodu pulzního laserového odpařování (laserová ablace), která zahrnovala výrobu fullerenu a nanotrubiček. Touto metodou bylo množství vyrobeného materiálu velice malé. Stejná skupina vědců později vyvinula metodu laserové ablace neboli metodu laserového odpařování. Tato metoda se osvědčila spíše pro výrobu vícečetných uhlíkových nanotrubiček, než fullerenu. [13]

Tato metoda využívá kontinuálního nebo přerušovaného laserového paprsku k odpaření grafitového prášku v peci při teplotě do 1200 °C. Tento režim je kontinuální a pracuje se světelnou hustotou 12 kW/cm<sup>2</sup>, proti tomu pulzní režim potřebuje téměř devět krát větší světelnou hustotu a to 100 kW/cm<sup>2</sup>. I v této metodě se používají plyny jako helium a argon. Tyto plyny jsou naplněny v peci, kde se udržuje konstantní tlak 500 Torrů (při použití rtuťových barometrů – milimetr rtuťového sloupce). Na povrchu se odpařují velmi horké

výpary, které poměrně rychle expandují a při chladnutí kondenzují a vytváří větší uhlíkové seskupení. V tomto případě se předpokládá, že vytváří i fullereny. Katalyzátory kondenzují pomaleji a váží se na uhlíkové struktury, kterým se brání v uzavírání do klecí. V případě, že se klecovité struktury uzavřou, dokážou je katalyzátory, které se na ně navážou znovu otevřít. Jednotěnné uhlíkové nanotrubičky pak rostou tak dlouho, dokud je dostatečná teplota okolí a uhlík se dostane na povrch katalyzátoru. V druhém případě rostou tak dlouho, dokud nejsou dostatečně velké. [13]

Výhodou této metody je kvalita připravených CNT, která je vyšší (až 90% čistota) a s přítomností katalyzátoru lze kontrolovat průměr vznikajících uhlíkových trubiček (CNT). [4]. Nevýhodou je, že se spoléhají na odpařování uhlíkových atomů od pevných částic nad teplotu 3000 °C, kdy nanotrubičky mají tendenci se zaplést a znesnadnit čištění a aplikaci vzorků. [13]

Tato metoda je velmi podobná metodě obloukového výboje, kdy pracuje za stejného atmosférického tlaku i směsi katalyzátorů. Reakce, ke kterým dochází, se pravděpodobně dějí stejným způsobem jako u metody obloukového odpařování. [13]



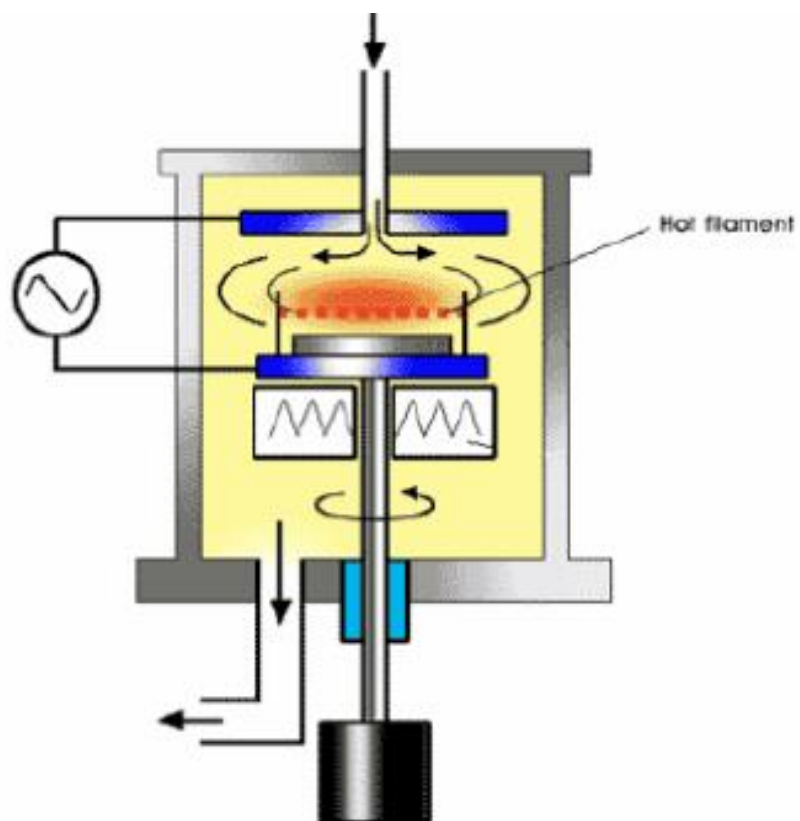
Obrázek 13: Schéma aparatury pro přípravu MWCNT v laserové ablaci [39]

### **5.3 Metoda CVD – Chemical Vapour Deposition**

Jedná se o chemickou depozici z plynné fáze v reaktoru, kde je zdrojem plazma nebo topný odporový drát. Pec se skládá ze tří částí. První část slouží jako vstupní, používá se k regulování množství plynů vstupujících do reaktoru pomocí speciálních ventilů řízených počítačem. Druhou část tvoří reaktor. V této části probíhají chemické reakce a způsobují usazování požadovaného materiálu na substrát. Zdrojem uhlíku je v tomto případě etylen nebo acetylen a katalyzátorem jsou částice železa, niklu nebo kobaltu. Reaktor je trubičkový a jeho teplota uvnitř se pohybuje v rozmezí 550 °C až 750 °C. Třetí, tedy poslední částí je část výstupní, která nám slouží k regulování tlaku v reaktoru. Pro regulaci tlaku je poslední část vybavena škrtícími ventily. [14]

V této metodě je zdrojem energie rozštěpení molekul na atomární uhlík a zbytkový plyn. Atomární uhlík poté prostupuje na vyhřívaný substrát, na který se váže. Homogenního rozkladu molekul uhlíku se používají jako substráty katalyzátory a to nejčastěji elementární kovy. Hlavní funkcí katalyzátorů je snížit aktivační energii reakce a tím dosáhnout nižší teploty v reaktoru. CNT se budou v katalyzátoru tvořit jen pod podmínkou zachování určitých podmínek. Druh katalyzátoru a reakční podmínky nám mohou ovlivnit typ trubiček, průměr nebo jejich orientaci. [14]

Katalyzátory, které se používají v metodě CVD jsou ve většině případů kovy, do kterých může vstupovat uhlík. Při vyšších teplotách uhlíkové atomy usazené na povrchu katalyzátoru pronikají do vsunutých vrstev katalyzátoru. Také je důležité správné zvolení rychlosti chlazení, kdy může dojít k tomu, že se atomy uhlíku budou vracet zpět na povrch a následně bude docházet k růstu vrstvy z opačné strany, což my není žádoucí. Dalším faktorem ovlivňujícím kvalitu vzniklých nanostruktur je drsnost katalyzátoru. Atomy uhlíku se usazují především na místech s vyšší povrchovou energií, tedy na místech hranic zrn a v místech poruch. [14]



Obrázek 14: Schématický diagram plasmového CVD zařízení [43]

## **6 Uhlíkové nanotrubičky v kompozitech**

Technologie nanočástic zahrnuje syntézu, proces charakterizace a aplikace nanočástic. V současné době přitahuje značnou pozornost, protože zaujímá širokou škálu možností využití, od oblasti medicíny, elektroniky až po stavební průmysl. Obecně platí, že nanočástice mají velikost částic od 1 do 100 nm. Charakteristické vlastnosti nanočástic jsou výrazně odlišné od těch ze sypkých materiálů. Aplikace nanotechnologie se stala hlavním tématem v oblasti cementu a betonu v posledním desetiletí. [9]

### **6.1 Nanočástice v cementu a betonu**

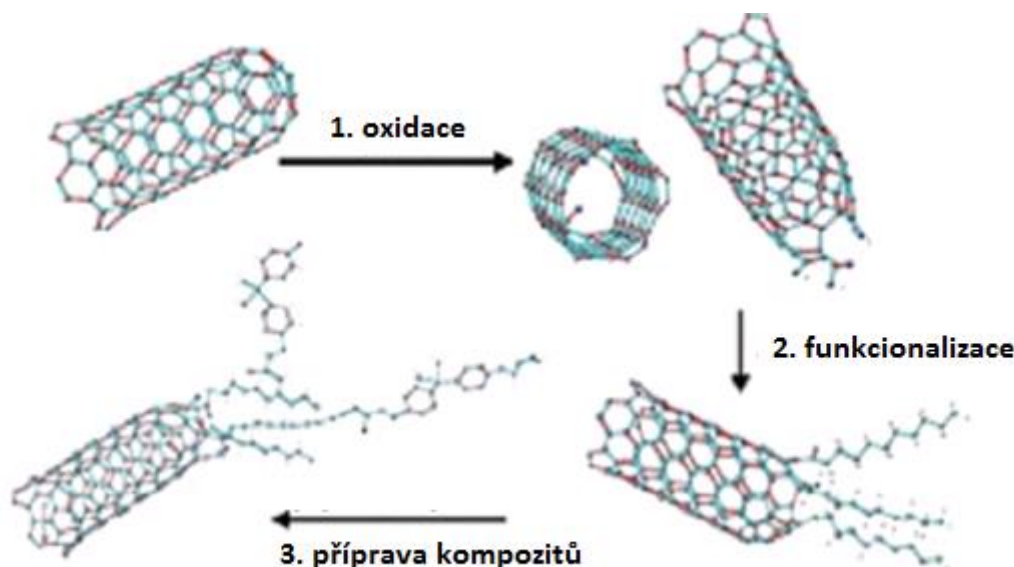
Nejčastěji prováděná studie o užívání nanočástic v cementu nebo v betonu byla na nano-oxidy. Především na oxid křemičitý a oxid železitý. Přidání těchto nanočástic do cementové pasty obsahující velký objem popílky a popele, zvýšilo pevnosti v tlaku. Nano-oxid železitý a nano-oxid křemičitý byly také používány pro zvýšení otěruvzdornosti betonu. Dalším nanooxidem je oxid titaničitý. Nedávno bylo oznámeno, že oxid titaničitý urychlil rychlost hydratace a zvýšil stupeň hydratace. Jeho fotokatalitické vlastnosti byly používány především k odstranění organických znečišťujících látek z povrchů přímo vystavených ultrafialovému záření, jako jsou povrchy vozovek. [9]

### **6.2 Kompozitní materiály**

Nanotrubičky se používají jako „nano“ výztuž. Jejich elastické a flexibilní chování, které jsou použity, jako plnivo do polymerních kompozitů nám zvyšuje odolnost proti mechanickému namáhání. Jejich dobrá elektrická a tepelná vodivost, a také nízká objemová hmotnost zlepšují výsledné vlastnosti materiálu.[6]

### **6.3 Funkcionalizace uhlíkových nanotrubiček**

Kromě extrémně vysokých pevnostních charakteristik se uhlíkové nanotrubičky vyznačují extrémní odolností proti smáčení. Špatná smáčivost uhlíkových nanotrubic v polymerní a cementové matici představuje největší technologický problém při přípravě nanokompozitů. Modifikace uhlíkových nanotrubic je v porovnání s modifikací uhlíkových vláken podstatně komplikovanější a technologicky náročnější. [43]



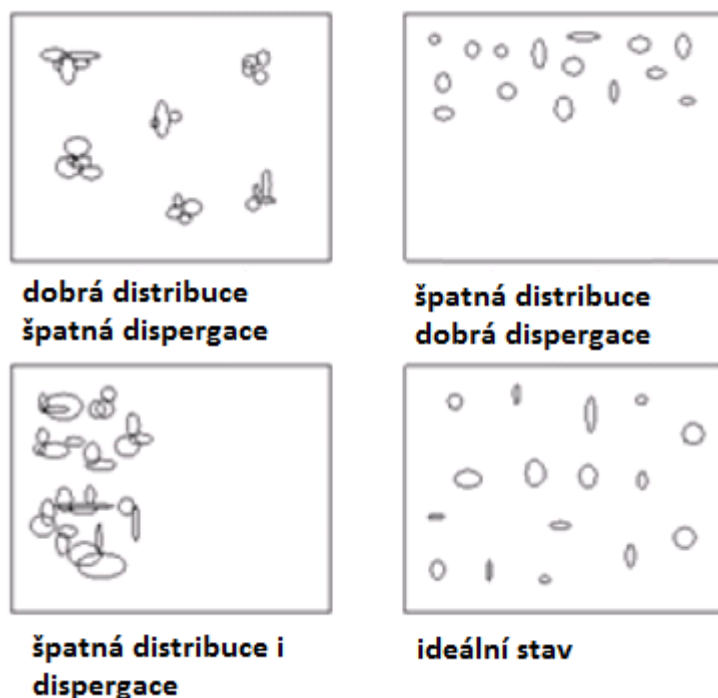
*Obrázek 15: Schéma funkcionalizace uhlíkových nanotrubic [43]*

Modifikace uhlíkových nanotrubic se uskutečňuje v rozpouštědle prostřednictvím sloučení obsahujících funkční skupiny (Obrázek 15). Během funkcionalizace se modifikátor adsorbuje na povrch uhlíkových nanotrubic. V optimálním případě dojde k chemickému navázání rozpouštědla na povrch CNT prostřednictvím Van der Waalsových vazeb, nebo silnějších kovalentních vazeb. Protože uhlíkové nanotrubičky jsou zakončeny podstatně reaktivnějšími fulerenovými molekulami, k navázání funkčním vazeb dochází přednostně na koncích uhlíkových nanotrubiček. [43]



## 7 Dispergace nanočástic

Příprava nanokompozitů s CNT je centrem zájmu současného výzkumu. Existuje mnoho typů nanokompozitů s CNT, ale u většiny je problém dispergace a distribuce CNT v matrici (Obrázek 16). Schopnost dispergace a distribuce CNT do matrice ovlivňuje nejvíce vlastnosti vzniknutého materiálu. [43]



*Obrázek 16: Schopnost deaglomerace CNT do matrice [43]*

Kvalitní disperze CNT se uskutečňuje pomocí ultrazvukového míchání nanotubic ve vhodné povrchově aktivní látce. Množství CNT v roztoku závisí na použité povrchově aktivní látce, čase, frekvenci a amplitudě ultrazvukového míchání. Při použití vhodného rozpouštědla je možné dosáhnout až 90 % individuálních nanotubic o průměru 1,5 nm anebo menším. [43]

Dispergace nanočástic zásadně ovlivňuje vlastnosti cementových a polymerních nanokompozitů (PNK). Ovšem není zřejmé, že jen jeden způsob dispergace povede k správnému rozmísení a optimalizaci makroskopických vlastností PNK. Podle způsobu přípravy a termodynamických parametrů mohou být nanočástice dispergovány. [8]

## **7.1 Dispergace MWCNT**

Dispergace zahrnuje velmi složité jevy, jelikož uhlíkové nanotrubic tvoří agregáty a aglomeráty. Dispergace je ovlivněna vzájemně na sebe působícími silami, a to: Van der Waalsovými mezi vlákny uhlíkových nanotubic a interakce mezi vlákny uhlíkovými nanotubic a disperzním prostředím.

Působení ultrazvukových vibrací vede ve většině případů k rozbití aglomerátů a ke vzniku samostatných trubic. Některé nanotrubic se zkracují na délku 100–300 nm. Karboxylové kyseliny se nachází na konci nanotubic a na jejich bočních stěnách. Tyto kyseliny dokážou nanotrubic vázat s organickými materiály a vytvářet kovalentní vazby.

Tato metoda má mnoho výhod pro dispergaci nanotubiček, protože Van der Waalsovy síly mezi nanotubičkami jsou omezené a povrchové vlastnosti se mění působením kyseliny.[8]

## **7.2 Mechanická dispergace**

Typickou dispergační metodou je mechanické mletí. Hrubé disperze se v tomto případě převádějí mletím či drcením na jemný prach, který se následně suspenduje v kapalině a tím vzniká koloidní systém. Takto připravené částice však nejsou zpravidla samy o sobě stabilní

a podléhají shlukování. Je tedy nutné do disperze přidat látky, které dané částice stabilizují. Ve většině případů způsobují stabilizaci koloidních částic ionty přidaného elektrolytu, které adsorbují na povrch částic, kde vytvářejí elektrický náboj. [20] Nevýhodou je, že mechanické mletí lze provést jen za určitého stupně dispezity. Druhou nevýhodou je nebezpečí kontaminace roztoku materiálem z vnitřních částí mlýnů, který vznikne otěrem při rozmělnování. [21] Tato metoda se dnes používá pouze tam, kde není kladen takový důraz na čistotu.

## **7.3 Ultrazvuková dispergace**

Tato metoda je běžně aplikována pro rozptýlení uhlíkových nanotubiček v tekutém médiu. V důsledku špatného smáčení vzduchové vrstvy mají plynové bubliny tendenci zachytit se na povrchu CNT nebo v mezerách svazků. Také povrchově aktivní látky používané ke stabilizaci disperzí CNT často silně pění. Vzhledem k tomu se přichozí ultrazvuková vlna odráží na vzduch z kapalného rozhraní. [22]



*Obrázek 17: Ultrazvukový dispergátor Sonopuls[42]*

## **7.4 Konkrétní typy zařízení pro dispergaci nanočástic**

### **7.4.1 Sonorex RK 31H**

Sonorex jsou ultrazvukové vany, které mají plášť z oceli. Některé typy mají do objemu 3 l mají kohout, kterým lze vany vyprazdňovat. Jsou vybaveny spínačem a lze je nastavit buď na trvalý chod, nebo zvolit délku trvání sonikace v intervalu 0 – ∞ minut. Typ vany s označením H říká, že je v něm zabudovaná topná spirála a lze regulovat teplotu od 30 do 80 °C bez možnosti zpětné kontroly.



*Obrázek 18: Ultrazvuková vana Sonorex RK 31H [23]*

#### **7.4.2 Magnetické míchadlo Phoenix Instrument RSM-10 HS**

Magnetické míchadlo je laboratorní přístroj, který nám slouží k homogenizaci pomocí rotující magnetické tyčinky umístěné v kádince s roztokem. Míchadlo značky Phoenix, které bylo použito při přípravě uhlíkové suspenze, má tepelný výkon 500 W a dokáže míchat až při 100 – 1500 otáčkách za minutu. [1]



*Obrázek 19: Magnetické míchadlo Phoenix Instrument RSM-10HS [1]*

### 7.4.3 Ultrazvukový kavitátor Sonopuls HD 3200

Tato metoda je popsána v kapitole 6.3 Ultrazvuková dispergace. Přístroj Sonopuls HD 3200 od německé firmy Bandelin Electronic a skládá se z následujících částí:

- generátoru
- konvertoru
- sonotrody
- sondy

Další nedílnou součástí přístroje je také stojan a rozetová nádoba.

Ultrazvukovým kavitátorem jsme dispergovali uhlíkové nanotrubičky ve vodném roztoku.



Obrázek 20: Ultrazvukový kavitátor Sonopuls HD 3200

## 8 Vliv teploty na dispergaci nanočástic

Vodné disperze pevných nanočástic jsou v podstatě stabilní po dobu až 3 roky, nicméně některé systémy vykazují růst částic a následně želatinaci. Jejich stabilita byla zkoumána jako funkce teploty skladování. Obecně, přívodem energie do systému (teplota, světlo) vede k růstu částic a následné gelovatění. Tento proces byl provázen poklesu zeta potenciálu od 15 mV až po 25 mV. Vliv obalového materiálu byl méně výrazný. Optimalizací skladování je teplota 8 °C ve tmě v silikonizovaných lahvičkách. [31]

### 8.1 Vliv teploty - experiment

Bylo provedeno několik experimentů, které zkoumaly, zda má vliv teplota na dispergaci nanočástic. Účinky teploty byly analyzovány při teplotách 8 °C, 20 °C a 50 °C za nepřístupu tepla. Skladování při teplotě 50 °C po vyvolání rychlého růstu částic během 3 dnů. Všechny vzorky byly v pevném stavu. Při pokojové teplotě (20 °C) docházelo ke zlepšení stability. Mikroviskozita zabraňuje fúzi filmových vrstev při kontaktu částic. Zvýšení teploty způsobí snížení mikroviskozity, což vede k destabilizaci. Skladování při 8 °C ve tmě, byly stabilní po dobu 3 let. [31]

### 8.2 Zeta potenciál

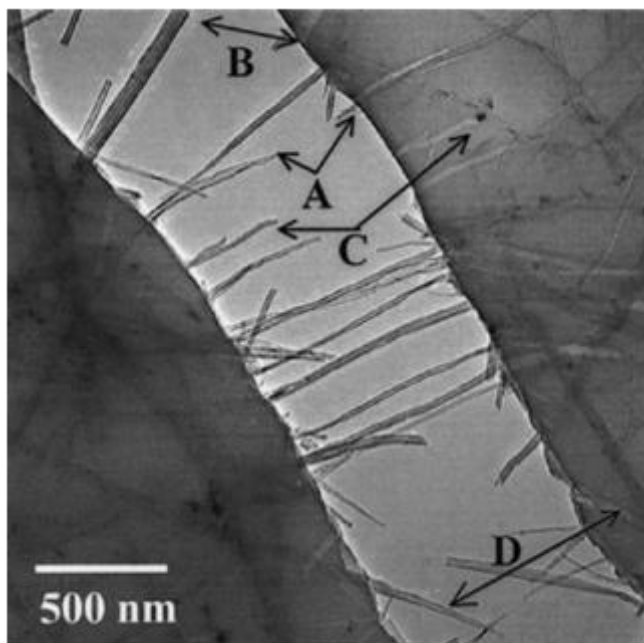
Povaha a intenzita povrchového náboje nanočástice je velmi důležitá, protože určuje vzájemné interakce s biologickým prostředím a také elektrostatické interakce s bioaktivními látkami. Pomocí zeta potenciálu (elektrokinetického potenciálu) nanočástic je hodnocena jejich koloidní stabilita. Tento potenciál je nepřímým měřítkem povrchového náboje a odpovídá rozdílu potenciálů mezi objemem kapaliny a tenkou vrstvou protiontů poutanou k povrchu částice, tedy na rozhraní mezi kompaktní a difúzní částí elektrické dvojvrstvy. Měření zeta potenciálu umožňuje předpovědět stabilitu koloidní suspenze během skladování. K zajištění stability a k zamezení agregace částic by mělo být dosaženo vysoké hodnoty zeta potenciálu (buď pozitivní, nebo negativní). V literatuře je uváděno, že pro zajištění stability disperzního systému by hodnota zeta potenciálu měla být alespoň  $\pm 30\text{mV}$ . Z hodnot zeta potenciálu lze také předpovídat míru hydrofobicity povrchu. [36]

Povrchovou hydrofobicitu je možno stanovit několika technikami jako je chromatografie s hydrofobní interakcí, adsorpce sond nebo také smáčecím úhlem. Měření povrchové

hydrofobicity je v poslední době sofistikovanou analytickou technikou uvedenou v literatuře pro povrchovou analýzu nanočástic. X-ray fotonová korelační spektroskopie umožňuje identifikaci specifických chemických skupin na povrchu nanočástic. [36]

### ***8.3 Vliv teploty na mechanické vlastnosti***

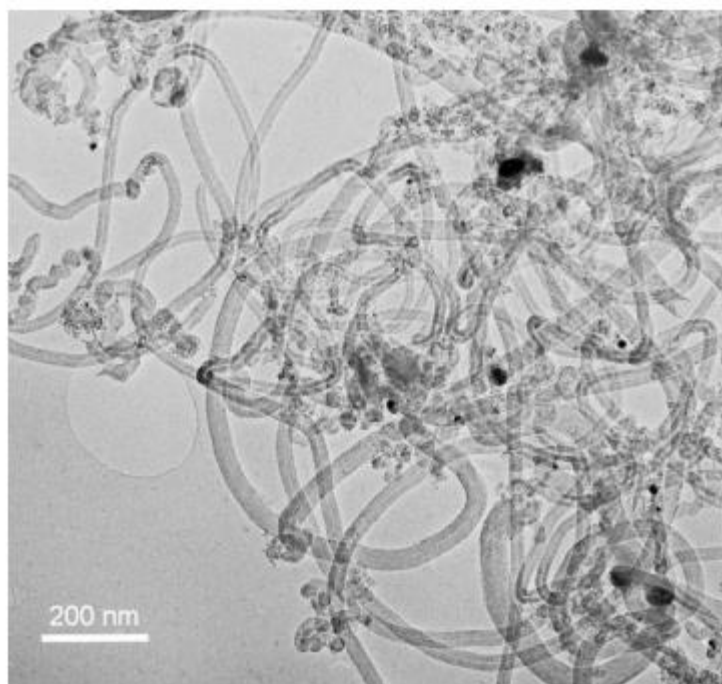
Mnoho úsilí při přípravě nanotrubiček do polymerních kompozitů bylo věnováno snaze využít tuhosti a pevnosti trubiček. Podle modulů pružnosti kompozitů v tahu byly hodnoceny dynamicko-mechanické tepelné vlastnosti kompozitů ve funkci zatížení a teploty nanotrubiček. Při výzkumu nanotrubiček byla snaha vytvořit kompozity o modulu pružnosti 150 Mpa. Výzkum probíhal při pokojové teplotě a byla získána experimentální data. Tato nízká hodnota může mít co do činění se špatným napětím než se slabostí samotných nanotrubiček. Nad teplotou skelného přechodu z polymeru ( $\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), měli nanotrubičky výraznější vliv na vlastnosti kompozitu. [5]



*Obrázek 21: TEM obraz trhliny u MWCNT vyvolané tepelným namáháním*

#### **8.4 Vliv teploty na MWCNT produkované katalýzou**

Obecně řečeno MWCNT syntetizované katalýzou mají tendenci být ve struktuře méně dokonalé než nanotrubičky vyrobené obloukovým odpařováním. Jak by se dalo očekávat, struktura katalyticky vyráběných trubiček silně závisí na podmínkách použití, a to zejména na teplotě. Pokud se připravuje při relativně nízkých teplotách (pod 600 °C) trubičky mají tendenci být nepravidelného tvaru a nedokonalé, jak je znázorněno na obrázku 22. V takových případech je grafítizace nízká. Při vyšších teplotách relativně dlouhé a dokonalé nanotrubičky mohou být vyrobeny jako spirálovitě stočené trubičky. [5]



*Obrázek 22: MWCNT vyrobené z ethylenu za použití zeolitového katalyzátoru při teplotě 288 °C. [5]*



## **9 Využití uhlíkových nanotrubiček**

Od první zmínky Iijimova objevu výroby trubiček se začaly používat v mnoha oblastech díky svým výjimečným vlastnostem elektrickým, mechanickým, optickým a mnoha dalších. Aplikace je dána především strukturou nanotrubiček – jejich délka, průměr, počet stěn, atd., které jim dodávají specifické vlastnosti. [16]

### ***9.1 Kompozitní materiály***

Nanotrubičky se používají jako výztuž v kompozitních materiálech. Elastické a flexibilní chování nanotrubiček, které se používá jako plnivo polymerních kompozitů, zvyšuje jejich odolnost vůči mechanickému namáhání. Mají dobrou elektrickou a tepelnou vodivost a s jejich nízkou hustotou zlepšují vlastnosti výsledného materiálu. [17]

### ***9.2 Mechanické aplikace***

Jak už bylo řečeno, nanotrubičky mají vysokou pevnost v tahu a vysoký modul pružnosti. Nanotrubičky se využívají pro kompozitní materiály, jako jsou výztužná lana, která mají téměř 100× vyšší pevnost a 6× nižší hmotnost, to je 600× vyšší poměr pevnosti k hmotnosti v případě oceli. [18]

### ***9.3 Senzory***

Vývoj a výzkum v oblasti senzorů může v blízké budoucnosti poskytnout senzory pro praktické využití. Jsou různé druhy senzorů, které se vyvíjí. Jsou to například senzory fyzikální, optické, plynové a biosenzory. Tyto senzory jsou založeny na principu změn elektrických vlastností. [41]

### ***9.3 Elektronické aplikace***

Díky vynikajícím vlastnostem a nanorozměrům nanotrubiček se ukázalo jako slibným prvkem pro využití elektronických materiálů. Nanotrubičky mohou vytvářet PN přechody, vodiče, také tranzistory a můžeme očekávat, že v budoucnosti i mikroprocesory)

Možnosti využití v elektronice:

- Chlazení i pro stávající elektroniku. Mají výjimečnou tepelnou vodivost podél trubiček, mohou odvádět teplo z malého horkého jádra procesu na větší plochu a také malý přestup mezi jednotlivými trubičkami.
- Field emission display – elektrony jsou vystřelovány z nanotrubiček a trojice miniděl na každý bod. V porovnání s klasickou katodovou obrazovkou nám odpadá nutnost vychylování a urychlování paprsku.
- Paměťový prvek – na obou stranách je uzavřená nanotrubička s molekulou fullerenu a může vykazovat dva stabilní stavy: fullerén na jednom/druhém konci trubky = jeden bit s předpínáním/čtením elektrickým polem na konci nanotrubek. Kapalice se uvádí řádově  $\text{cm}^3$ . [18]

#### ***9.4 Energetické aplikace***

Jelikož CNT mají výhodné elektronické a elektrické vlastnosti, velký povrch a elektrochemickou stabilitu, mohou být alternativou pro elektrody. Uhlíkové nanotrubičky jsou nadějně pro aplikace, jako jsou solární články, palivové články, superkondenzátory nebo lithium-iontové baterie. [18]

## 10 Čištění nanotrubiček

Každá metoda výroby obsahuje kromě uhlíkových nanotrubiček také velké množství nečistot, jejichž druh a množství závisí právě na použité technice. Nejběžnější nečistotou jsou uhlíkaté materiály, jako je grafitový list nebo amorfni uhlík. Mezi další nečistoty patří také kovové katalyzátory a menší fullereny. Každá nečistota ovlivňuje vlastnosti CNT. Abychom lépe porozuměli výsledkům studia nanotrubiček, je nutné, aby zkoumané vzorky byly homogenní a co nejčistší. Klasické techniky používají pro čištění metodu zahřívání pod zpětným chladičem, za použití silných kyselin, které mají vliv na strukturu nanotrubiček. Čištěním uhlíkových nanotrubiček se odstraní amorfni uhlík, zvyšuje se nebo se snižuje objem mikropórů atd. [7]

Techniky čištění můžeme rozdělit do dvou skupin. První skupinou je strukturní selekce a druhou velikostně selektivní separace. První metoda oddělí CNT od nečistot, oproti tomu druhý zajistí stejný průměr nebo velikost. [7]

Metody čištění mohou ovlivnit vlastnosti CNT, proto je důležité jejich výzkumu věnovat pozornost. Technik, které lze k čištění využít je několik. [7] Některými z nich jsou: oxidace, čištění kyselinou, magnetické čištění, ultrazvuk, žíhání a tepelné zpracování, mikrofiltrace nebo také chromatografie.

S různými technikami pro čištění bude dosaženo odlišných výsledků. Je třeba proto dbát na to, kterou techniku zvolíme. Hlavním účinkem bude také volba vzorku v závislosti na jeho složení, které zvolíme. Žádoucí jsou techniky, které pouze strhnou uhlíkové nečistoty a kovy, aniž by se změnil CNT. Někdy by měla být zvolena zvláštní péče u procesních veličin, jako je teplota v rozsahu a čase. Ekonomicky proveditelné produkce a čištění ve velkém měřítku techniky jsou stále ve fázi vývoje. [7]

### 10.1 Oxidace

Touto metodou se odstraňují uhlíkaté nečistoty a kovy. Hlavní nevýhodou této metody je to, že kromě nečistot dochází i k oxidaci CNT. Naštěstí poškození CNT je malé. Výhodou této metody je, že nečistoty jsou nejčastěji připevněny ke katalyzátoru. Celkově účinnost a výtěžek tímto postupem závisí na mnoha faktorech, jako je obsah kovu, doba oxidace, životním prostředím, oxidačním činidlem a teplotě. [7]

## **10.2 Čištění kyselinou**

Obecně platí, že pokud chceme odstranit kovový katalyzátor kyselinou, musí být povrch kovu vystaven oxidaci nebo ultrazvuku. Na kovový katalyzátor se poté nechá působit kyselina chlorovodíková nebo kyselina dusičná a během 24 hodin kdy bude kyselina působit, dojde k jeho vyleptání. [7]

## **10.3 Magnetické čištění**

V této metodě jsou feromagnetické částice mechanicky odstraněny z grafitových skořepin. Suspenze CNT se smísí s anorganickými nanočásticemi, především oxidem zinečnatým nebo uhličitánem vápenatým. V ultrazvukové lázni dojde k odstranění feromagnetických částic, které jsou zachyceny permanentními magnety. Po následném čištění kyselinou dostáváme téměř dokonale čisté CNT. Tato metoda nevyžaduje velká zařízení a umožňuje výrobu CNT, která neobsahují žádné magnetické nečistoty, v laboratorních podmínkách. [7]

## **10.4 Ultrazvuk**

Tato metoda je založena na separaci částic v důsledku ultrazvukových vibrací. Aglomeráty různých nanočástic budou nuceny vibrovat a dojde k jejich rozptýlení. Separace částic je vysoce spolehlivá na povrchově aktivní látky, rozpouštěla a reakční složky. Rozpouštědla ovlivňují stabilitu dispergovaných trubek v systému. Ve slabých rozpouštědlech jsou CNT více stabilní a jsou stále připojeny ke kovu. Při použití kyseliny závisí čistota CNT na době expozice. [7]

## **10.5 Žíhání a tepelné zpracování**

Vzhledem k vysokým teplotám (873-1873 K), které se v této metodě využívají, dojde ke změnám CNT a odstranění nečistot. Vysoká teplota také způsobuje pyrolýzu grafitu a krátkých fullerenu. Při použití vysokých teplot dojde k roztavení a odstranění kovu. [7]

## **10.6 Mikrofiltrace**

Mikrofiltrace je založena na velikosti nebo separaci částic. CNT a malé množství uhlíkových nanočástic se zachytí na filtru. Ostatní nanočástice (kovové nanočástice

a katalyzátory, fullereny a uhlíkové nanočástice) filtrem procházejí. Jedním ze způsobů oddělování fullerenů z CNT od mikrofiltrace je nejprve namočení do roztoku sulfidu vápenatého. Nerozpustné CNT se poté zachytí na filtru. [7]

### ***10.7 Chromatografie***

Tato technika se především používá k oddělení malých množství CNT od frakcí s malou délkou a nevhodným průměrem. CNT jsou vedeny přes sloupec s porézním materiálem. Počet pórů závisí na velikosti CNT. To znamená, že čím menší molekula bude mít delší dráhu při průchodu sloupcem i delší čas průchodu, tím větší molekula bude mít delší čas průchodu. [7]

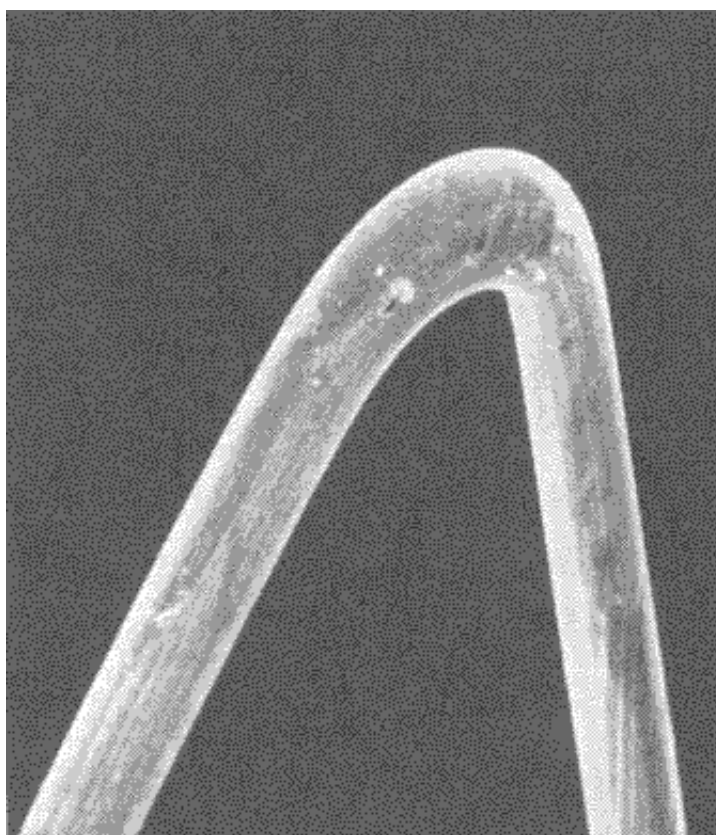
S různými technikami pro čištění CNT bude dosaženo odlišných výsledků. Technika čištění také závisí na množství a složení vzorku. Žádoucími jsou techniky, které pouze oddělí uhlík od nečistot a struktura CNT se nezmění. [7]

## 11 Charakterizační metody CNT

Je vyšetření pomocí elektronového mikroskopu (v jednom případě je tvořen elektronový paprsek, místo světla, tvoří obraz pro prohlížení. Obraz může být viděn na fluorescenčním stínítku nebo může být fotografován. [27]

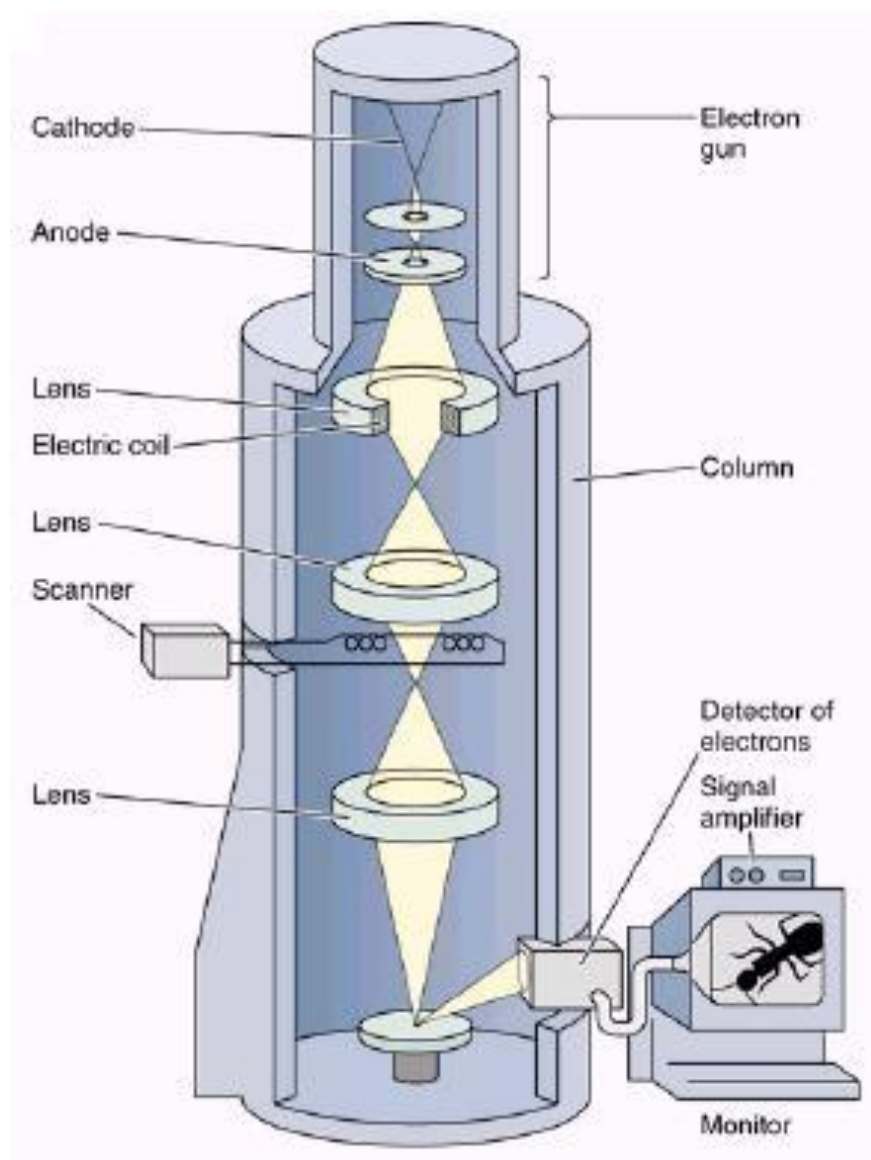
### 11.1 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

Zdrojem elektronů v této metodě se používá wolframové vlákno (Obrázek 16), Lanthan hexaborid ( $\text{LaB}_6$ ), nebo také wolframový vyzařovací hrot. [25]



*Obrázek 23: Katoda z wolframového vlákna [30]*

V rastrovacím elektronovém mikroskopu, je malý elektronový paprsek, který je zaměřen na vzorek. Obraz je tvořen pixel po pixelu, díky skenování přes vybrané oblasti vzorku. Generované signály jsou zaznamenávány. Na rozdíl od TEM metody, které vyžadují velmi tenké vzorky, metoda SEM může zkoumat i vzorky kompaktní. Pomocí této metody lze získat cenné informace o morfologii, povrchové typologii a složení. SEM mikroskopy dosahují rozlišení pod 1 nm. [24]



Obrázek 24: Skenovací elektronový mikroskop [27]

### 11.1.1 Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA 3 XM

Rastrovací elektronový mikroskop (SEM – scanning electron microscope) MIRA 3 XM má Schottkyho autoemisní katodu, a je určen pro snímání vodivých i nevodivých preparátů ve vysokém rozlišení. Je možné pozorování objektů menších než 1 nm a zvětšení až 600 000 $\times$ . Toho dosahuje díky svazku úzkých elektronů, který je po řádcích vysílán proti vzorku. Elektrony vzájemně působí s povrchem vzorku a podle jeho charakteru vznikají detekovatelné signály, ze kterých se sestavuje výsledný obraz.

Pro SEM analýzu je nezbytné, aby povrch preparátu byl vodivý. V případě že není, musíme na vzorky před samotným pozorováním nanést vrstvičku zlata pro zlepšení vodivosti. Pro tento účel nám posloužila naprašovačka Quorum Q150R ES.



*Obrázek 25: Naprašovačka Quorum Q150R ES*





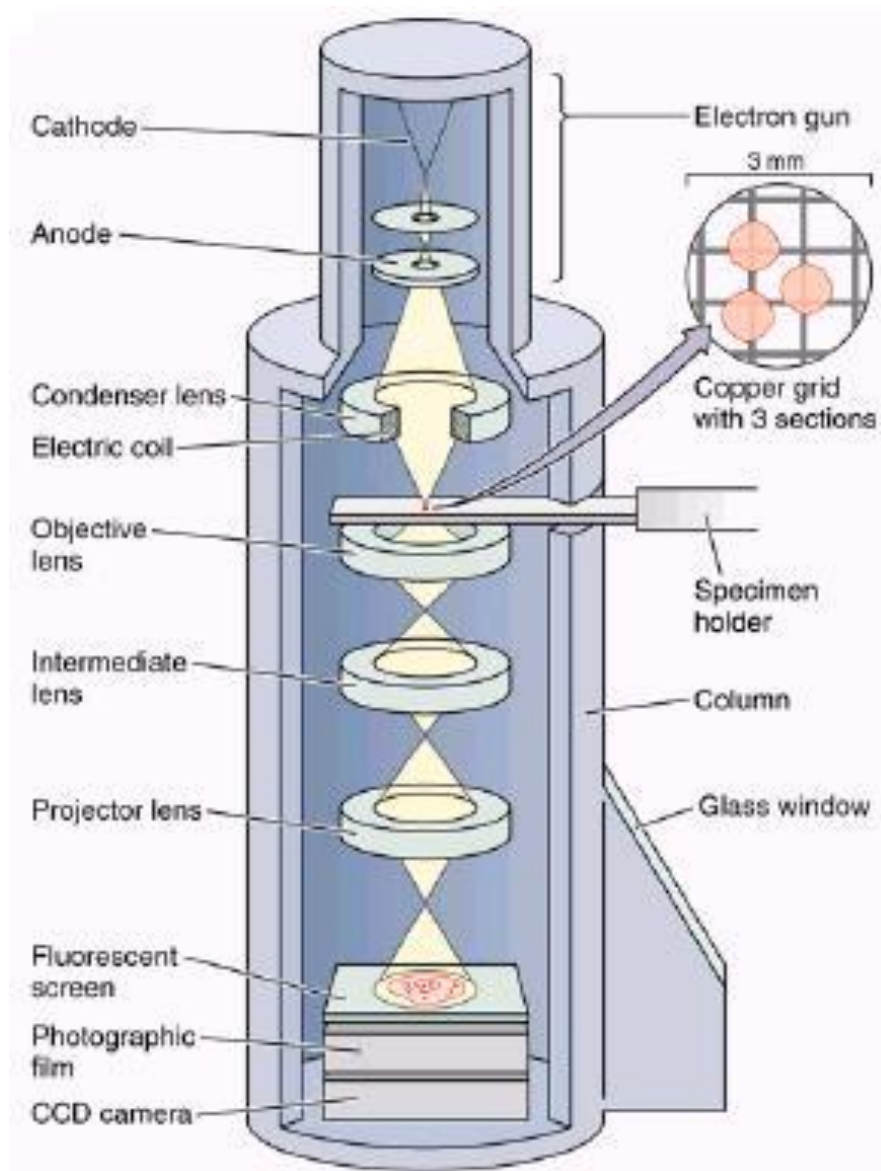
*Obrázek 26: Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 XM*

### **11.2 Transmisní elektronová mikroskopie (TEM)**

Vývoj elektronového mikroskopu závisí na pochopení elektronové optiky na úpravě či minimalizaci odchyly způsobené magnetickou čočkou. V roce 1931 v Berlíně, Knoll a Ruska sestavili dvoustupňový transmisní elektronový mikroskop s magnetickými čočkami se zvětšením až  $13\times$ . Ruska sestavil o dva roky později TEM se třemi magnetickými čočkami. Jedna z čoček se chovala jako kondenzátor a další dvě čočky byly promítacími objektivy, které zvětšovaly vzorek na stínítku. Kamera umístěná mimo vakuum TEM mohla fotografovat zvětšený obraz na stínítku obrazovky. První komerční TEM byl vyroben ve Velké Británii (Mulvey, 1989). [26]

Základní model TEM se skládá z následujících částí: elektronová tryska, která slouží jako zdroj elektronů, preparát umístěný v držáku zaměřuje elektronový paprsek, který vzniká v kondenzaci čoček, objektiv, dvě čočky. Rozlišovací síla a kvalita obrazu je závislá na

objektivu a jeho vadách. Objektiv poskytuje široký rozsah zvětšení, lze dosáhnout až do výše 1 000 000×. [26]



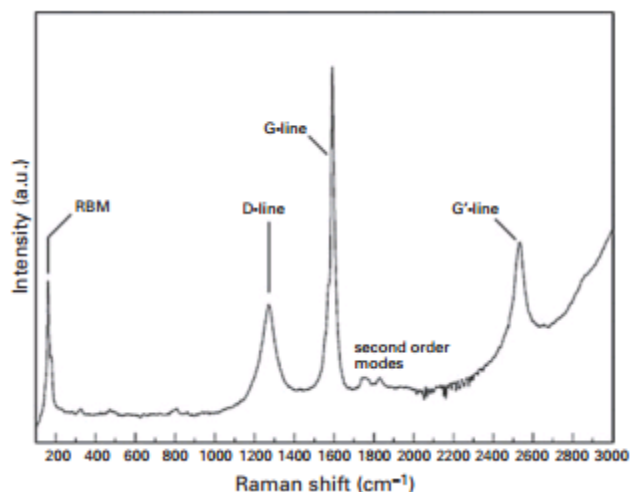
Obrázek 27: Transmisní elektronový mikroskop [27]

### 11.3 Infračervená spektroskopie (IR)

Pojem použití multidimenzionální nelineární infračervené spektroskopie pro získání molekulární struktury s časovým rozlišením se jeví jako velmi nadějná. Metody důležité pro identifikaci dynamických struktur v kapalinách. Optimální IR metody zahrnují schopnost kontroly reakce. Analogický přístup IR spektroskopie vyžaduje více IR impulsů, které mají definovanou fázi amplitudy a šířku spektrálního pásma. [28]

### 11.4 Ramanova spektroskopie

Ramanova spektroskopie byla vyvinuta v roce 1970. Skládá se z elektrických komponentů (směr – x) a magnetická složka (směr – y), které jsou na sebe kolmé. Vzorek je ozařován laserovými paprsky v UV viditelném pásmu k vyvolání účinku. Rozptýlené světlo se skládá ze dvou typů: Reyleighův rozptyl je silná a má stejnou frekvenci jako dopadajícího svazku světelných paprsků. Druhá je velmi slabá a nazývá se Ramanův rozptyl. [29]



Obrázek 28: Ramanovo spektrum na vzorku SWCNT [5]

## 12 Rizika při používání nanomateriálů

Výroba nanočástic sebou nese možná rizika spojením s jejich působením na životní prostředí i lidské zdraví. Nanomateriály vznikající přírodními procesy jsou součástí atmosférického prachu a vytváří se při přírodních událostech (sopečné erupce, požár lesa aj.). Mohou vznikat také jako vedlejší produkt následkem průmyslových procesů (uvolňování v podobě par během svařování, tavení kovů nebo také jako součást automobilových výfukových plynů). Miliony tun nanočástic jsou vyrobeny pro komerční účely. Nano-oxid křemičitý se používá jako mazivo, nanočástice oxidu titaničitého jsou přidávány do krémů a barviv. Se zvyšující se produkcí a používání nanomateriálů má za důsledek rostoucí hromadění těchto materiálů v životním prostředí. [34]

### 12.1 Toxicita nanočástic

Samotná nanočástice nemusí být toxická, ale může působit s toxickou organickou látkou. Nebezpečnost této látky nezávisí tedy pouze na její toxicitě, ale také na tom, zda může daná látka přijít do kontaktu s živými buňkami. Ke změně povrchu nanočástic může dojít chemickou modifikací či degradací. [34]

Řada publikací poskytuje principy toxicity nanočástic. Jde především o následující:

- Toxicita způsobená velikostí částic;
- toxicita způsobená povrchovým napětím;
- toxicita způsobená chemickým složením;
- toxicita způsobená tvarem částic;
- toxicita způsobená transportními schopnostmi;
- toxicita způsobená velikostí dávky

Tyto uvedené druhy toxicity vycházejí pouze ze známých druhů a potvrzují, že nanočástice mají své specifické parametry. [35]

Výzkum interakcí uhlíkových nanotrubiček s biologickými systémy co se týče nanotoxicity, je stále ještě v raném stádiu.

Jeden z prvních pokusů s cílem posoudit zdravotní rizika uhlíkových nanotrubic byl proveden na univerzitě ve Varšavě. Zabývali se vlivem sazí přítomných v nanotrubičkách

na funkci plic. Ovšem nebyly nalezeny žádné důkazy o případné abnormalitě. Jiný výzkum potvrdil, že nanotrubičky mohou vyvolat zánět plicní tkáně.

Špatnou zprávou je, že jsou různé názory toxicity uhlíkových nanotrubic. S ohledem na pokračující nejistoty v této oblasti je zřejmé, že je nutná opatrnost při přípravě i manipulaci s těmito materiály. Měla by být přijata opatření, aby se zabránilo jejich vdechnutí. Pokud jde o kontakt s pokožkou, je doporučeno nosit rukavice při manipulaci s nanotrubičkami.

[5]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### **13 Cíl experimentu**

Cílem této práce je zhodnotit vliv teploty na dispergaci nanočástic v cementové maltě a stanovit vliv nanočástic na fyzikálně-mechanické vlastnosti cementového kompozitu. V první etapě byla provedena dispergace nanočástic pomocí ultrazvukové vany.

### **14 Použité materiály a zařízení**

#### ***14.1 Použité materiály***

Byly použity uhlíkové nanotrubičky z Ruska. Tyto nanotrubičky byly dodány bez bližší specifikace, bez udání jakýchkoliv parametrů a složení. Proto byla provedena jejich analýza pomocí SEM. Jako pojivo byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R od firmy Českomoravský cement, a.s., závod Mokrá. Jako plnivo byl použit normalizovaný křemičitý písek CEN. Voda byla použita destilovaná.

#### ***14.2.5 Použitá laboratorní zařízení***

Při experimentech byla použita tato zařízení: laboratorní míchačka pro přípravu malt dle ČSN EN 196-1, vibrační stůl pro zhutnění malty, formy pro výrobu zkušebních těles o rozměrech 40 × 40 × 160 mm, laboratorní váhy, analytické váhy, posuvné měřidlo, zkušební zařízení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku dle ČSN EN 196-1, ultrazvuková vana Sonorex RK 31H, ultrazvukový kavitátor Sonopuls HD 3200, rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 XM

## **15 Experiment**

### **15.1 Receptura**

Nanotrubičky jako rozptýlená výztuž se obvykle dávkuje v množství 0,0025 – 0,1 %. Všechny záměsi byly dispergovány v roztoku, který obsahoval plastifikační přísadu.

Zkoumání vlastností vzorků bylo prováděno po 1, 3, 7 a 28 dnech. Ke každé záměsi byla vytvořena referenční záměs se stejnou dávkou superplastifikační přísady, ale bez nanotrubiček.

### **15.2 Příprava vzorků**

#### **15.2.1 Příprava suspenze**

Nejprve byla navážena superplastifikační přísada a uhlíkové nanotrubičky na analytických vahách. Poté bylo do odměrné nádoby s nanotrubičkami přesně naváženo potřebné množství vody. Portlandský cement byl navážen na laboratorních vahách.

Nejprve byla pro dispergaci navržena ultrazvuková vanička Sonorex RK 31H.

#### **15.2.2 Výroba zkušebních těles**

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku cementových malt bylo provedeno na zkušebních trámcích o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Jejich výroba byla provedena dle ČSN EN 196-1 (Namíchání cementové malty v normalizované míchačce, Naplnění trojforem čerstvou cementovou maltou a její 2 minutové hutnění na vibračním stole, Překrytí forem fólií a uložení ke zrání, Po 24 hodinách odformování vzorků, označení a uložení do vodního prostředí o teplotě  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ ).

### **15.3 Postupy zkoušek**

#### **15.3.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku**

Pevnosti zkušebních vzorků byly stanoveny po 1,3,7 a 28 dnech dle ČSN EN 196-1. Pevnost v tahu za ohybu se zkouší třibodovým ohybem na zkušebním zařízení až do porušení vzorku. Vypočítá se ze vztahu:

$$R_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_t \cdot l}{b \cdot h^2} [Mpa]$$

kde:  $R_f$  – pevnost v tahu za ohybu [Mpa]  
 $b$  – šířka zatěžovacího trámečku [mm]  
 $h$  – výška zatěžovacího trámečku [mm]  
 $F_t$  – zatížení při porušení [N]  
 $l$  – vzdálenost mezi podporami [mm]

Pevnost v tahu se vyjádří jako aritmetický průměr tří hodnot s přesností na 0,1 MPa.

Pevnost v tlaku se zkouší na polovinách trámečků zlomených při stanovení pevnosti v tahu za ohybu. Trámečky se vkládají do lisu tak, aby koncové hrany přesahovaly asi o 10 mm.

Pevnost v tlaku se vypočítá ze vztahu:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} [MPa]$$

kde:  $R_c$  – pevnost v tlaku [MPa]  
 $F_c$  – zatížení při porušení [N]  
1600 – plocha zatěžovacích destiček [mm<sup>2</sup>]

Pevnost v tlaku se vypočítá jako aritmetický průměr šesti hodnot s přesností na 0,1 MPa.

Při odlišnosti jednoho výsledku z šesti hodnot o více než  $\pm 10 \%$ , vzorek se vyřadí a počítá se ze zbývajících pěti.

### **15.3.2 SEM – rastrovací elektronová mikroskopie**

Sledování mikrostruktury pomocí SEM bylo pro zjištění rozměrů použitých uhlíkových nanotrubiček a ověření dispergace v cementové matrici. Sledování bylo provedeno na čistých nanotrubičkách ve formě prášku a ze zlomků trámečků po stanovení pevnosti v tlaku.





*Obrázek 29: Připravené zkušební vzorky pro sledování na SEM*

## **16 Výsledky**

### ***16.1 Dispergace pomocí ultrazvukové vaničky***

Veškeré konkrétní výsledky bakalářské práce, grafické vyhodnocení a záznamy z měření jsou uvedeny v neveřejné verzi bakalářské práce, která je uložena na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební.

### ***16.2 Dispergace pomocí ultrazvukového kavitátoru***

Veškeré konkrétní výsledky bakalářské práce, grafické vyhodnocení a záznamy z měření jsou uvedeny v neveřejné verzi bakalářské práce, která je uložena na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební.

### ***16.3 Pevnost v tahu za ohybu***

Tato zkouška je pro cementové kompozity vyztužované uhlíkovými nanotrubičkami velice zásadní. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 4 a 5 a v Grafu 2. Ke každé sadě vzorků byla vyrobena referenční záměs bez nanotrubiček pro porovnání výsledků. V tabulkách je vedle pevností v tahu za ohybu uveden procentuální nárůst nebo pokles pevností s ohledem na

referenční pevnost vzorku. Pro snadnější orientaci jsou nárůsty pevnosti označeny zelenou barvou a poklesy barvou červenou.

**Veškeré konkrétní výsledky bakalářské práce, grafické vyhodnocení a záznamy z měření jsou uvedeny v neveřejné verzi bakalářské práce, která je uložena na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební.**

#### ***16.4 Pevnost v tlaku***

Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 6 a 7 a v grafu 3.

**Veškeré konkrétní výsledky bakalářské práce, grafické vyhodnocení a záznamy z měření jsou uvedeny v neveřejné verzi bakalářské práce, která je uložena na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební.**

Na základě rešerší literatury lze přepokládat, že pokud jsou uhlíkové nanotrubičky dobře dispergované, pevnost v tlaku cementových kompozitů zvyšují. Naopak když dobře dispergované nejsou, znamená to, že nám uhlíkové nanotrubičky vytvářely shluky a vznikají slabá místa v cementové matici.

#### ***16.5 SEM – rastrovací elektronová mikroskopie***

Cílem sledování pomocí SEM bylo především zjistit délkové parametry uhlíkových nanotrubiček a ověřit správnou dispergaci v zatvrdlé cementové matici u odebraných vzorků. Struktura nanotrubiček byla zjišťována na uhlíkových nanotrubičkách v práškové formě.

**Veškeré konkrétní výsledky bakalářské práce, grafické vyhodnocení a záznamy z měření jsou uvedeny v neveřejné verzi bakalářské práce, která je uložena na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební.**

## 17 Diskuse výsledků

Cílem experimentu bylo navrhnout a ověřit možnosti dispergace uhlíkových nanotrubiček v cementové matici za účelem zlepšení mechanických vlastností.

Použitými nanotrubičkami byly nanotrubičky z Ruska, o kterých nabyly dodány žádné informace. K vytvoření stabilní disperze byla nejprve použita ultrazvuková vanička Sonorex RK 31H, ale její použití se ukázalo jako nevhodné, z důvodu nemožnosti udržet nízkou teplotu suspenze. I když byly pro chlazení suspenze použity ocelové kuličky, teplota rapidně stoupala a to by bylo nežádoucí. CNT při vyšších teplotách hůře disperguje. Z tohoto důvodu byla pro vytvoření stabilní suspenze použita metoda ultrazvuková sonda. Následně byla z cementové malty vytvořena zkušební tělesa o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm pro zkoušení pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku cementových kompozitů ve stáří 1, 3, 7 a 28 dní.

Při zkoušce pevnosti v tlaku došlo u všech zkušebních vzorků s ruskými nanotrubičkami k růstu oproti referenčnímu vzorku. Jak již bylo řečeno dříve, je to způsobeno chováním CNT, kdy zhutňují strukturu cementové matrice. Prachové částice na ruských CNT mohou fungovat jako filler.

Na rastrovacím elektronovém mikroskopu byla ověřována dispergace nanočástic prostřednictvím jejich zakomponování do ztvrdlé cementové pasty a byla zjišťována jejich morfologie. Na vzorku ruských uhlíkových nanotrubiček bylo vidět, že jsou značně znečištěny prachovými částicemi. Prachové částice se mohou chovat jako nanofiler, který může vyplňovat jemné póry v cementové matici. Na vzorcích odebraných po porušení cementového kompozitu po zkouškách pevnosti bylo dost obtížné rozeznat uhlíkové nanotrubičky od ettringitu a C-S-H fází. Ovšem nebylo nalezeno místo, kde by byly přítomny shluky nanočástic. Z těchto poznatků vyplývá, že namíchané vzorky byly správně dispergovány.

**Veškeré konkrétní výsledky bakalářské práce, grafické vyhodnocení a záznamy z měření jsou uvedeny v neveřejné verzi bakalářské práce, která je uložena na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební.**

## 18 Závěr

Bakalářská práce shrnuje poznatky o uhlíkových nanotrubičkách, jejich historii, výrobě a možnostech jejich využití. V úvodních kapitolách jsou uvedeny základní poznatky z oblasti nanotrubiček. Je popsána jejich struktura, vlastnosti a také jejich výroba. Dále se teoretická část bakalářské práce zabývala dispergací, využitím a čištěním nanotrubiček, které je pro uplatnění nanotrubiček velice důležité. Byly získány informace o vlivu teploty při výrobě uhlíkových nanotrubiček a vlivu na mechanické vlastnosti cementové matrice. V neposlední řadě byly diskutovány charakterizační metody, které jsou pro určení typu a kvality nanotrubiček zásadní.

Praktická část bakalářské práce byla zaměřena především na nalezení správného způsobu dispergace uhlíkových nanotrubiček ve vodní suspenzi a jejich zapojení do cementové matrice. Na cementovém kompozitu s nanotrubičkami byly potom sledovány mechanické vlastnosti. Na základě rešerší literatury lze konstatovat, že uhlíkové nanotrubičky tvoří rozptýlenou výztuž, a tomu odpovídaly také dosažené výsledné pevnosti. Vytvořený kompozit vykazoval lepší vlastnosti, než referenční vzorky bez nanotrubiček.

Nanotrubičky představují výrazné možnosti pro zlepšení cementových kompozitů. Jejich výraznější rozšíření do konkrétních aplikací bohužel často brání stále ještě příliš vysoká cena a náročná příprava takto upravených cementových kompozitních materiálů.

## 19 Zdroje

- [1] webová stránka. *novolab*. [online]. 2014 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <https://www.novolab-labware.com/rsm-10-hs-magnetische-roerder-inox-opp.html>
- [2] Jirásek, J., Vavro, M.: *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3
- [3] LIONETTO, Francesca, et al. *A methodology to orient carbon nanotubes in a thermosetting matrix*. Composites Science and Technology, 2014, 96: 47-55.
- [3] Francesca, a další. *A methodology to orient carbon nanotubes in a thermosetting matrix*. Composite Science and Technology. 2014, Sv. 96, pp 47-55.
- [4] Beran, Zdeněk. *Vysoce deformovatelný kompozitní materiál na bázi polyuretanu a elektricky vodivé sítě z uhlíkových trubiček pro detekci deformace*. Zlín, 2012. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Slobodian, Ph.D.
- [5] Harris, Peter J. F. Carbon. *Nanotube Science - Synthesis, properties and applications*. 1. vydání. Londýn : Cambridge University Press, 2009. p. 179. ISBN 978-0-521-51691-7.
- [6] Costa, P., Ansós - Casaos, A. a Matinez, M.T. *Effect of carbon type and functionalization on the electrical, thermal, mechanical and electromechanical properties of carbon nanotube/ styrene - butadiene- styrene composite for large strain sensor applications*. Composite: Part B. 2014, 61, pp 136-146.
- [7] Aqel, Ahmad, Ammar, Reda A.A a Al-Warthan, Abdulrahman. *Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation*. Arabian Journal af Chemistry. Review, 2012, 5, pp 1-23.
- [8] Ham H. T., Choi, Y. S., Chung, I. J.: *An Explanation of Dispersion States of Singlewalled Carbon Nanotubes in Solvents and Aqueous Surfactant Solutions Using Solubility Parameters*, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 286, pp. 216 – 223, 2005.

- [9] Raki, L.; Beaudoin, J. J.; Alizadeh, R.; Makar, J. M.; Sato, T.: *Cement and concrete Nanoscience and Nanotechnology*. Material 2010, 3.
- [10] Aqel, Ahmad, Ammar, Reda A.A a Al-Warthan, Abdulrahman. *Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation*. Arabian Journal of Chemistry. Review, 2012, 5, pp 1-23.
- [11] Koutná, Martina. *Uhlíkové nanotrubičky (CNT) a jejich aplikační možnosti*. Zlín, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická. Vedoucí diplomové práce Ing. Barbora Šafaříková.
- [12] Popov, Valentin N. *Carbon nanotubes: properties and application*. Materials Science and Engineering. Reports: A Review Journal, 2004, 43, stránky 61-102.
- [13] Merchan - Merchan, Wilson, a další. *Combustion synthesis of carbon nanotubes and related nanostructures*. Progress in Energy and Combustion Science. 2010, Sv. 36, stránky 696-727.
- [14] Dai, Hongjie. *Carbon nanotubes: opportunities and challenges*. Surface Science. 2002, Sv. 500, stránky 218-241.
- [15] Plazmon. wikipedia.org. [Online] 6. 5. 2013. [Citace: 17. 5. 2016.] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Plazmon\\_\(kvazi%C4%8D%C3%A1stice\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Plazmon_(kvazi%C4%8D%C3%A1stice))
- [16] Prášek, Jan. *Uhlíkové nanočástice: grafen, nanočástice, fullereny*. [Online][Citace: 18. 5. 2016] <http://www.umel.feec.vutbr.cz/nanoteam/data/soubory/CTN,%20grafen,%20fullerenCNTs+grafen+fullereny.pdf>
- [17] Costa, P., Ansós - Casaos, A. a Matinez, M.T. *Effect of carbon type and functionalization on the electrical, thermal, mechanical and electromechanical properties of carbon nanotube/ styrene - butadiene- styrene composite for large strain sensor applications*. Composite: Part B. 2014, 61, stránky 136-146.
- [18] Purkrt, Adam. *Nanotrubičky a další uhlíkové makromolekuly*. fyzsem.fjfi. [Online] 3. 1. 2011. [Citace: 5. 5. 2014.] <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2001-2002/Zima01/procs/nanotubes.pdf>.

- [19] *Uhlíkové vlákno*, wikipedia.org. [online]. 26. 2. 2016 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9\\_vl%C3%A1kno](https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno)
- [20] BRDIČKA R.; DVOŘÁK J.: *Základy fyzikální chemie*, Academia, 1977.
- [21] KVÍTEK L.; PANÁČEK A.: *Základy koloidní chemie*, Olomouc, 2007.
- [22] SATO, H.; SANO, M. *Characteristics of ultrasonic dispersion of carbon nanotubes aided by antifoam. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, 322.1: 103-107.
- [23] Ivo Grandič. grandic.cz. [online]. 2005 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.grandic.cz/cistici-technika-bandelin-rk-31-h-sonorex-super-ultrazvukova-cisticka-0-9-l-s-ohrevem>
- [24] *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. ETH Zürich. [online]. 6.12.2015 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.microscopy.ethz.ch/sem.htm>
- [25] EGERTON, Ray F. The scanning electron microscope. In: *Physical Principles of Electron Microscopy*. Springer US, 2005. p. 125-153.
- [26] B.R. Masters, *History of the Electron Microscope in Cell Biology*, *ENCYCLOPEDIA OF LIFE SCIENCES*. (2009) 1–9.
- [27] *Microscopy*. <http://www.ufrgs.br/>. [online]. 2001 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: [http://www.ufrgs.br/imunovet/molecular\\_immunology/microscopy.html](http://www.ufrgs.br/imunovet/molecular_immunology/microscopy.html)
- [28] Asplund, M. C., Zanni, M. T., & Hochstrasser, R. M. (2000). *Two-dimensional infrared spectroscopy of peptides by phase-controlled femtosecond vibrational photon echoes*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(15), 8219–8224.
- [29] MERIANI, Sergio. *RAMAN ANALYSIS OF DENTIN-ADHESIVE INTERFACE. INGEGNERIA E SCIENZA DEI MATERIALI*. 2007-2008, pp 1-150.
- [30] Nebesářová J. *Elektronová mikroskopie pro biology*. <http://www.paru.cas.cz/>. [online]. 2001 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/3.1.html>

- [31] FREITAS, Chrysantha a Rainer H. MÜLLER. *Effect of light and temperature on zeta potential and physical stability in solid lipid nanoparticle (SLN<sup>TM</sup>) dispersions*. International Journal of Pharmaceutics. 1998, 15 June 1998(168), pp 221–229.
- [32] KUBÍNEK, Roman a Vendula STRÁNSKÁ. *Úvod do problematiky nanotechnologií*. , str. 1- 22
- [33] *Nanotechnologie*. <https://cs.wikipedia.org>. [online]. 13.4.2016 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z:<https://cs.wikipedia.org/wiki/Nanotechnologie>
- [34] Borovcová, Lucie. *Nanomateriály a nanotechnologie v analytické chemii*. Olomouc, 2010. Bakalářská práce. Univerzita palackého v Olomouci, fakulta přírodovědecká. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Karel Lemr, Ph. D.
- [35] Labaj, Martin. *Betony s vysokoteplotními popílky aktivovanými nanočásticemi*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí diplomové práce prof. ing. Rudolf Hela, CSc.
- [36] PAL, Sovan Lal, et al. Nanoparticle: an overview of preparation and characterization. Journal of Applied Pharmaceutical Science, 2011, 1.6: 228-234.
- [37] HEIDELBERGCEMENT ČESKÁ REPUBLIKA. Českomoravský cement: HeidelbergCement Group [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/home.htm>
- [38] Spires T., Brown R. M.: High Resolution TEM Observations of Single-Walled Carbon Nanotubes, Department of Botany, The University of Texas at Austin, Austin,Tx., 78713, 1996. <http://www.botany.utexas.edu/facstaff/facpages/mbrown/ongres/tspires/hexa.htm>
- [39] Ando Y., Zhao X., Sugai T., Kumar M.: Growing Carbon Nanotubes, Review Feature, Materials today, Vol. 22, p. 22 – 29, 2004
- [40] Daenen M., Fouw, R. D., Hamers, B., Janssen, P. G. A., Schouteden, K., Veld, M. A. J.: The Wondrous World of Carbon Nanotubes (a review of current carbon nanotube technologies), Eindhoven University of Technology, 2003, p. 89.
- [41] Yamada T., Hayamizu Y., Yamamoto Y. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection, Nature nanotechnology, Vol. 6, p. 296 - 301, 2011.



- [42] Ultrazvuk. <http://www.ultrazvuk-sro.cz/>. [online]. 2015 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://www.ultrazvuk-sro.cz/produkty/ultrazvuk-laboratore-medicinu/uz-homogenizatory/sonopuls-aplikace>
- [43] DULEBA, Branislav; KRASINSKIY, Ph D. Eng Volodymyr. Uhlíkové nanotrubičky – materiál pre budúcnosť. Transfer inovácií, 2011, 21 –s 192: 197.
- [44] FIALOVÁ, Barbora. Uhlíkové nanotrubičky ve stavebních materiálech. Brno, 2013. 40 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.
- [45] Kristýna Cederová, *Vliv vstupních parametrů dispergace na kvalitu rozmíchání nanočástic*. Brno, 2016. 69 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnářová, Ph.D

## 20 Seznam příloh

### 20.1 Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Jednotěnné nanotrubičky (SWCNT) vlevo a víceštěnné nanotrubičky (MWCNT) vpravo[5].....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2: Počet článků o uhlíkových nanotrubičkách od roku 2000 do roku 2007. [5] .....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3: Formy čistého uhlíku [43] .....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4: Rozložení atomů uhlíku v hexagonální mřížce – (a) SWCNT, (b) armchair, (c) zigzag, (d) chiral [43] .....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 5: Vzdálenosti mezi uhlíkovými atomy uvnitř grafitové mřížky [38] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 6: Schématické znázornění „švýcarského válce“ vlevo a „ruské panenky“ vpravo [5] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 7: Simulace křehkého lomu jednotěnné nanotrubičky při deformaci [5] .....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 8: Závislost Youngova modulu pružnosti na průměru shluků CNT [43] .....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 9: Optická absorpční spektra SWCNT připravené metodou oblouku [5] .....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 10: Absorpční spektrum SWCNT [7] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 11: Magnetické vnímání uhlíku allotropů jako funkce teploty od práce [5] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 12: Schéma aparatury pro přípravu MWCNT v elektrickém oblouku [39] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 13: Schéma aparatury pro přípravu MWCNT v laserové ablaci [39] .....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 14: Schématický diagram plasmového CVD zařízení [43] .....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 15: Schéma funkcionalizace uhlíkových nanotrubic [43] .....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 16: Schopnost deaglomerace CNT do matrice [43] .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 17: Ultrazvukový dispergátor Sonopuls[42] .....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 18: Ultrazvuková vana Sonorex RK 31H [23] .....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 19: Magnetické míchadlo Phoenix Instrument RSM-10HS [1] .....</i>	<i>36</i>

<i>Obrázek 20: Ultrazvukový kavitátor Sonopuls HD 3200 .....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 21: TEM obraz trhliny u MWCNT vyvolané tepelným namáháním.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 22: MWCNT vyrobené z ethyleny za použití zeolitového katalyzátoru při teplotě 288 °C. [5].....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 23: Katoda z wolframového vlákna [30] .....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 24: Skenovací elektronový mikroskop [27].....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 25: Naprašovačka Quorum Q150R ES .....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 26: Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 XM.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 27: Transmisní elektronový mikroskop [27] .....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 28: Ramanovo spektrum ze vzorku SWCNT [5] .....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 29: Připravené zkušební vzorky pro sledování na SEM .....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 30: SEM snímek uhlíkových nanotrubiček, zvětšeno 500× (vlevo) a 2000× (vpravo) .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 31: SEM snímek uhlíkových nanotrubiček, zvětšeno 5000× (vlevo) a 60000× (vpravo) .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 32: SEM snímek uhlíkových nanotrubiček v cementové matrici, zvětšeno 60000×, CNT jsou označeny šipkami .....</i>	<i>64</i>

## **20.2 Seznam grafů**

<i>Graf 1: Průběh teploty homogenizované suspenze v čase při použití ultrazvukové vana Sonorex RK 31H.....</i>	<i>59</i>
<i>Graf 2: Procentuální změna pevnosti v tahu za ohybu cementové matrice vyztužené uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků ve stáří 1, 3, 7 a 28 dní..</i>	<i>61</i>
<i>Graf 3: Procentuální změna pevnosti v tlaku cementové matrice vyztužené uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tlaku referenčních vzorků ve stáří 1, 3, 7 a 28 dní. ....</i>	<i>62</i>

### 20.3 Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Porovnání vlastností uhlíkových vláken a uhlíkových nanotrubiček [43] .....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2: Receptury záměsí včetně použité dispergační energie .....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 3: Teploty naměřené při dispergaci nanočástic v ultrazvukové vaničce.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 4: Pevnosti v tahu za ohybu cementové malty ve stáří 1 a 3 dny a jejich procentuální změny proti pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků .....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 5: Pevnosti v tahu za ohybu cementové malty ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny proti pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků + porovnání s pevnostmi čínských nanotrubiček.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 6: Pevnosti v tlaku cementové malty ve stáří 1 a 3 dny a jejich procentuální změny proti pevnosti v tlaku referenčních vzorků .....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 7: Pevnosti tlaku cementové malty ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny proti pevnosti tlaku referenčních vzorků + porovnání s pevnostmi čínských nanotrubiček .....</i>	<i>61</i>

## 21 Seznam použitých zkratk

CNT	uhlíkové nanotrubičky (z angl. carbon nanotube)
SWCNT	jednotěnné uhlíkové nanotrubičky (z angl. single walled carbon nanotube)
MWCNT	vícetěnné uhlíkové nanotrubičky (z angl.. multi walled carbon nanotube)
AFM	mikroskopie atomárních sil (z angl. atomic force microscopy)
CVD	chemická depozice (z angl. Chemical Vapour Deposition)
C <sub>60</sub>	molekula uhlíku známá jako buckyball
He	helium
Ar	argon
PNK	polymerní nanokompozity
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
LaB <sub>6</sub>	lanthan hexaborid
TEM	transmisní elektronová mikroskopie
IR	infračervená spektroskopie
SP	superplastifikační přísada
C-S-H	kalciium hydrosilikát